



Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

Identificación de perfiles de viento en banco de ensayos y monitorización de aerogeneradores para aplicaciones en minieólica

Titulación: Ingeniería Industrial

Alumno/a: Francisco Javier Pardo Balibrea

Director/a/s: Ángel Molina García

Antonio Sánchez Kaiser

Cartagena, 26 de septiembre de 2013

Índice

Capítulo 1: Introducción.

Marco energético y legislativo. Objeto del proyecto

1.1.	Introducción	6
1.2.	Marco energético y legislativo	8
1.2.1.	Marco energético	8
1.2.2.	Marco legislativo	9
1.3.	Objeto del proyecto	10
1.3.1.	Estudio previo	10
1.3.2.	Tipos de ensayos	10
1.3.3.	Otras tareas del trabajo de investigación	11

Capítulo 2: Descripción del banco de ensayos

2.1.	Introducción	12
2.2.	Estructura	13
2.3.	Actuadores: ventiladores y variadores de frecuencia	14
2.3.1.	Ventiladores	14
2.3.2.	Variadores de frecuencia	16
2.4.	Sistema de medida: sensores, transductores y sistema de adquisición de datos	17
2.4.1.	Sensores y transductores	17
2.4.1.1.	Anemómetros de hilo caliente	17
2.4.1.2.	Sensor de temperatura	18
2.4.1.3.	Sensor de presión	20
2.4.1.4.	Sensores de velocidad de giro	21
2.4.1.5.	Transductor de tensión	25
2.4.1.6.	Transductor de intensidad	26
2.4.2.	Sistema de adquisición de datos	27
2.5.	Equipos auxiliares de medida de parámetros eléctricos	30
2.5.1.	Multímetro digital	30
2.5.2.	Osciloscopio digital	30
2.6.	Aerogenerador	33
2.7.	Otros equipos	35

2.7.1. Batería	35
2.7.2. Inversor	35

Capítulo 3: Análisis del comportamiento fluido – mecánico y eléctrico – mecánico del aerogenerador

3.1. Introducción	36
3.2. Planificación de los ensayos	37
3.2.1. Configuración de elementos homogeneizadores	37
3.2.2. Medidas de velocidad de viento	39
3.2.3. Medidas de temperatura y presión absoluta	42
3.2.4. Selección de frecuencia de la f.e.m. de ventiladores	42
3.2.5. Parámetros de ensayo	42
3.3. Cálculos justificativos	43
3.3.1. Cálculo de la densidad del aire	43
3.3.2. Cálculo de la potencia eólica	44
3.3.3. Cálculo del área barrida por el aerogenerador DS – 300	45
3.3.4. Cálculo del coeficiente de potencia	45
3.3.5. Cálculo de la velocidad específica	46
3.4. Ensayos con rejilla intermedia y perfil izquierdo	47
3.4.1. Comprobación de la bondad en las medidas	47
3.4.2. Comparativa de perfiles de viento con y sin rejilla intermedia	49
3.4.3. Perfil de viento completo con rejilla intermedia	58
3.4.4. Perfil de viento completo con tobera reductora	62
3.4.5. Comparativa de perfiles de viento completos	65
3.4.6. Conclusiones	71
3.5. Análisis eléctrico – mecánico	72

Capítulo 4: Análisis del comportamiento eléctrico del aerogenerador

4.1. Introducción	77
4.2. Descripción teórica del sistema eléctrico	78

4.2.1.	Generador eléctrico	78
4.2.1.1.	Frecuencia de la máquina – frecuencia de la f.e.m.	78
4.2.1.2.	Efecto de imanes permanentes	79
4.2.1.3.	Ventajas de utilizar imanes permanentes	80
4.2.1.4.	Modelo eléctrico equivalente del alternador	80
4.2.2.	Rectificador trifásico	85
4.2.2.1.	Diodo de potencia	85
4.2.2.2.	Tipos de rectificadores trifásicos no controlados	85
4.2.2.3.	Conmutación no instantánea	88
4.2.3.	Batería o acumulador	90
4.3.	Cálculos justificativos	91
4.3.1.	Variables eléctricas fundamentales: tensión, intensidad y potencia	91
4.3.2.	Comparativa con análisis por serie trigonométrica de Fourier	92
4.3.2.1.	Cálculos relacionados con valores a la salida del alternador trifásico	92
4.3.2.2.	Cálculos asociados a los valores de batería	96
4.4.	Planificación de los ensayos	97
4.4.1.	Condiciones de ensayo	97
4.4.2.	Parámetros de configuración en Data Logger	98
4.4.3.	Guardar datos de osciloscopio	98
4.5.	Ensayos iniciales	100
4.5.1.	Comparativa de medida de los equipos	100
4.5.2.	Secuencia de fases del sistema trifásico	101
4.5.3.	Caracterización del rectificador trifásico	103
4.6.	Ensayos con rejilla intermedia	105
4.6.1.	Ensayos en vacío: controlador desconectado	105
4.6.2.	Ensayos en carga: controlador y batería conectados	107
4.6.3.	Comparativa de resultados de ensayos en vacío y en carga. Factor de regulación	111
4.6.4.	Conclusiones de los ensayos eléctricos con rejilla intermedia	113
4.7.	Ensayos sin rejilla intermedia	114
4.7.1.	Resultados circuito inicial en carga	114
4.7.2.	Comparativa de resultados de ensayos con y sin rejilla	116
4.7.3.	Resultados con filtro pasa – bajo en carga	117
4.7.4.	Comparativa de resultados de ensayos con y sin filtro pasa – bajo	118
4.7.5.	Curva característica exterior	125
4.7.6.	Conclusiones de los ensayos sin rejilla intermedia	127

4.8.	Ensayos con tobera reductora	129
4.8.1.	Ensayos en carga: controlador y batería conectados	129
4.8.2.	Ensayos en vacío: controlador desconectado	133
4.8.3.	Comparativa de resultados de ensayos en vacío y en carga. Factor de regulación	133
4.8.4.	Resultados con filtro pasa – bajo en carga	134
4.8.5.	Conclusiones de los ensayos con tobera reductora	135
4.8.6.	Circuito de rectificación alternativo	135
4.9.	Cálculo del rendimiento global de la instalación eólica	137
4.9.1.	Cálculo de la potencia eléctrica consumida en la instalación	137
4.9.2.	Diagrama de Sankey de potencia	138

Capítulo 5. Bibliografía

5.1.	Libros	139
5.2.	Trabajos de investigación	139
5.3.	Información de internet	140

Capítulo 1

Introducción. Marco energético y legislativo. Objeto del proyecto

1.1. Introducción

El presente proyecto se ha realizado acuerdo al trabajo de investigación propuesto por los departamentos de Ingeniería Eléctrica y de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Además, este trabajo de investigación se encuentra dentro del programa de Becas de Colaboración 2012 – 2013 del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

Se trata de un proyecto enmarcado en el sector de energías renovables, concretamente dentro de la rama de energía eólica. Esta energía es asociada normalmente a los aerogeneradores de alta potencia, que se agrupan formando parques eólicos, los cuales son propiedad de las grandes empresas generadoras de electricidad (En España, principalmente Iberdrola y Endesa), y que se emplean para inyectar energía a la red eléctrica. Sin embargo, existen diversos tipos de aerogeneradores según su potencia nominal:

Denominación	kW	Utilización
Muy baja ¹	< 1	Embarcaciones, sistemas de comunicación, refugios de montaña, iluminación, etc.
	1-10	Granjas, viviendas aisladas (sistemas EO-FV), bombeo, etc.
Baja	10-100	Comunidades de vecinos, PYME's (sistemas mixtos EO-Diesel), drenaje, tratamientos de aguas, etc.
Media	100-1 000	Parques eólicos (terreno complejo)
Alta	1 000-10 000	Parques eólicos (terreno llano, mar adentro)
Muy alta	> 10 000	En fase de investigación y desarrollo, requieren nuevos diseños y materiales no convencionales. No antes del año 2010

1.- Esta clase se divide según la potencia en microaerogeneradores (< 1 kW) y miniaerogeneradores (1-10 kW).

Fuente: Energía Eólica IDAE

Tabla 1.1. Clasificación de aerogeneradores para producción eléctrica según su potencia

Así, el presente proyecto concierne al estudio del comportamiento de microaerogeneradores. Este tipo de tecnología es útil en: viviendas, pequeños locales del sector servicios, sistemas de comunicación, embarcaciones, iluminación,... En general, se utilizan para alimentar instantáneamente cargas eléctricas de baja potencia, o bien, para almacenar la energía en baterías. El primer caso es el menos habitual, debido a la aleatoriedad de la fuente de energía de esta tecnología: el viento.

El estudio del comportamiento del microaerogenerador del presente proyecto, se ha llevado a cabo en un banco de ensayos de energía eólica que dispone la Universidad Politécnica de Cartagena en una nave situada en Santa Lucía (Cartagena). Todos los elementos por los que está formada dicha instalación, se definen en el siguiente capítulo.

Para comprender la importancia de disponer en la universidad de una instalación de energía eólica de este tipo, véase el siguiente apartado.

1.2. Marco energético y legislativo

Tanto el marco energético y el marco legislativo en el que se encuentra actualmente la energía eólica dentro del sector eléctrico español, y más concretamente los microaerogeneradores, son fundamentales para comprender la importancia de investigar en este sector.

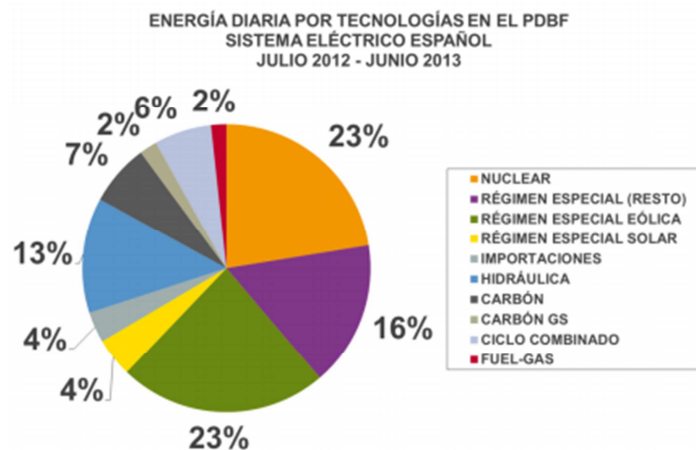
1.2.1. Marco energético

La estrategia energética promovida por la Unión Europea que tiene como objetivo desempeñar la denominada “3ª Revolución Industrial”, tiene sus pilares fundamentales en los siguientes aspectos:

- Energías renovables
- Eficiencia energética

De esta forma, se consiguen una serie de ventajas, como: liderazgo tecnológico, disminuir la dependencia energética, reducir las emisiones al medio ambiente y aumentar la seguridad de abastecimiento.

En España, el sector de la energía eólica está creciendo a pasos agigantados durante los últimos años. Para corroborar este hecho, se atiende al último informe del OMIE, denominado “Evolución del mercado de energía eléctrica”. En este documento, se muestra la producción de energía eléctrica por tecnologías en el sector eléctrico español desde julio 2.012 a junio de 2.013:



Fuente: Informe del OMIE

Figura 1.1. Producción de electricidad por tecnologías en España

Destaca que la producción de electricidad por energía eólica es líder junto con la energía nuclear, siendo notablemente mayor que otras tecnologías tan destacables como centrales de ciclo combinado o hidráulicas, entre otras.

1.2.2. Marco legislativo

Por otro lado, es importante describir el entorno legislativo en el que se encuentra el sector de la energía eólica, más específicamente el que está asociado al autoconsumo de electricidad mediante el uso de energías renovables.

El documento oficial más actual que concierne al anterior caso, es el segundo borrador de Real Decreto sobre el autoconsumo, enviado a la CNE (Comisión Nacional de la Energía) por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo el pasado 18 de julio de 2013. Su título completo es el siguiente:

“Proyecto de Real Decreto por el que se establece la regulación de las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo”.

En el caso que finalmente se establezca el Real Decreto en el que aparece todo lo estipulado en el anterior borrador, los consumidores acogidos al autoconsumo de electricidad estarán obligados a realizar acciones como:

- Completar una **solicitud** a la compañía eléctrica, pagando los derechos de acometida de generación establecidos por la compañía.
- Firmar un **contrato** con la compañía suministradora, aunque no se vierta energía a la red.
- Disponer de **dos contadores** de medida horaria con comunicación remota, encareciendo así la instalación.
- Pagar un impuesto denominado **“peaje de respaldo”**, por la energía que se autoconsume y que por tanto nunca llega a la red eléctrica nacional. Este impuesto estará exento sólo en el caso de instalaciones de cogeneración.
- **Ceder gratis toda la energía que no se consuma instantáneamente a la compañía eléctrica.**

De esta forma, la consecución de este Real Decreto supondría un paso hacia atrás en la consecución de la “3ª Revolución Industrial” promovida por la Unión Europea.

En conclusión, el marco energético y legislativo de la energía eólica en España, y más concretamente la relacionada con los microaerogeneradores, conllevan a realizar un estudio completo del comportamiento del aerogenerador de baja potencia. El objetivo principal de este estudio es determinar la eficiencia del aerogenerador, para establecer si es viable económicamente su adquisición para autoconsumo.

1.3. Objeto del proyecto

El objeto fundamental del proyecto es el estudio del comportamiento del aerogenerador comercial **DS – 300**. Sin embargo, este proyecto está integrado en un trabajo de investigación ya citado anteriormente, por lo que no sólo abarca la consecución del presente documento.

1.3.1. Estudio previo

Las principales **funciones previas** a la realización de ensayos que definan el comportamiento del aerogenerador, son las siguientes:

- 1) **Conocimiento preliminar de los equipos de medida de la instalación eólica:** sensores, sistema de adquisición de datos, equipos de medida de parámetros eléctricos,... Todos estos equipos serán definidos en el siguiente capítulo.
- 2) **Estudio previo del comportamiento teórico del aerogenerador.** El aerogenerador estudiado se corresponde al modelo *DS – 300*, y será descrito brevemente en el Capítulo 2. Además de la información aportada por el fabricante, hay que justificar el comportamiento eléctrico teórico propio de la maquina eléctrica dispuesta en el DS – 300: *alternador trifásico de imanes permanentes*. Este aspecto se detalla en el Capítulo 4.
- 3) **Análisis inicial del funcionamiento eléctrico de los otros equipos que componen el sistema eólico.** Se trata de estudiar equipos eléctricos esenciales para el funcionamiento global del sistema como: variador de frecuencia, batería, rectificador y filtro pasa – bajo. Esta información aparece en el Capítulo 4.

1.3.2. Tipos de ensayos

Los tipos de ensayos a realizar vendrán determinados fundamentalmente por tres **factores**:

- 1) **Equipos implicados.**
- 2) **Variables a medir.**
- 3) **Disposición de elementos de regulación de flujo de aire.** En este caso, dependerá del *número de paneles de rejilla*, o bien, de la presencia de una *tobera* que fija el flujo de aire desde los ventiladores hacia la sección de barrido del aerogenerador.

Todos los resultados de los ensayos, así como su completa descripción y principales conclusiones, aparecen en los capítulos 3 y 4.

1.3.3. Otras tareas del trabajo de investigación

Existen otras labores no menos importantes, que han sido realizadas simultáneamente con los ensayos del aerogenerador. Aunque no se van a desarrollar en su contenido, si es importante destacarlas:

- 1) **Adecuar y adquirir los equipos de medida necesarios para un óptimo funcionamiento del banco de ensayos.**
- 2) **Redactar las instrucciones básicas para la utilización de todos los equipos de medida.**
- 3) **Elaborar un software SCADA de la instalación eólica mediante LabVIEW.** Así se establece un software base que puede ser modificado y/o mejorado por usuarios posteriores a la realización de este trabajo de investigación. Se ha elegido LabVIEW porque es un lenguaje gráfico, modulable y fácilmente adaptable a nuevas condiciones de ensayos.
- 4) **Detallar todas las funciones implementadas en Matlab y las hojas de cálculo de Excel.** En un primer instante, se ha utilizado Excel para realizar un rápido estudio estadístico de los datos obtenidos. Matlab se ha empleado para obtener los resultados numéricos y gráficas finales de todos los ensayos.

Capítulo 2

Descripción del banco de ensayos

2.1. Introducción

Se dispone de un banco de ensayos abierto para emular el comportamiento real de un aerogenerador de pequeña potencia. El propósito es crear condiciones reales de entorno, a partir de una temperatura, presión y velocidad de viento determinada, y así poder determinar el comportamiento del aerogenerador mediante la toma de datos adquiridos por el sistema de medida presente.

Al poder regular la velocidad de viento mediante unos variadores de frecuencia, se pueden obtener los distintos parámetros de tensión e intensidad para cada velocidad de viento, así como los perfiles de viento completos. Estos variadores de frecuencia controlan la frecuencia de la f.e.m. (fuerza electromotriz) de los motores asíncronos acoplados a unos ventiladores. Así, entre otras variables, se puede contrastar los valores teóricos de potencia que garantiza el fabricante a distintas velocidad de viento, con los valores obtenidos en los distintos ensayos.

Los distintos componentes y equipos que componen del banco de ensayo son:

- 1) Estructura.
- 2) Actuadores: ventiladores y variadores de frecuencia.
- 3) Sistema de medida: sensores, transductores y sistema de adquisición de datos.
- 4) Equipos auxiliares de medida de parámetros eléctricos:
 - Multímetro digital.
 - Osciloscopio digital: sonda diferencial de tensión y pinza amperimétrica.
- 5) Aerogenerador.
- 6) Otros equipos:
 - Batería.
 - Inversor.

2.2. Estructura

La estructura instalada fue diseñada para soportar el peso de los ventiladores, así como las vibraciones y movimientos producidos bajo la carga estática y dinámica de estos mismos ventiladores. Además, la estructura fue confeccionada para soportar el peso de los aerogeneradores de pequeña potencia que se dispongan para su estudio.

Así, se elaboró la estructura con perfiles de aluminio ligero de 45 x 45 mm y con paneles de rejilla de aluminio. Las dimensiones del banco de ensayos son de 2.700 mm de ancho y 4.000 mm de largo.

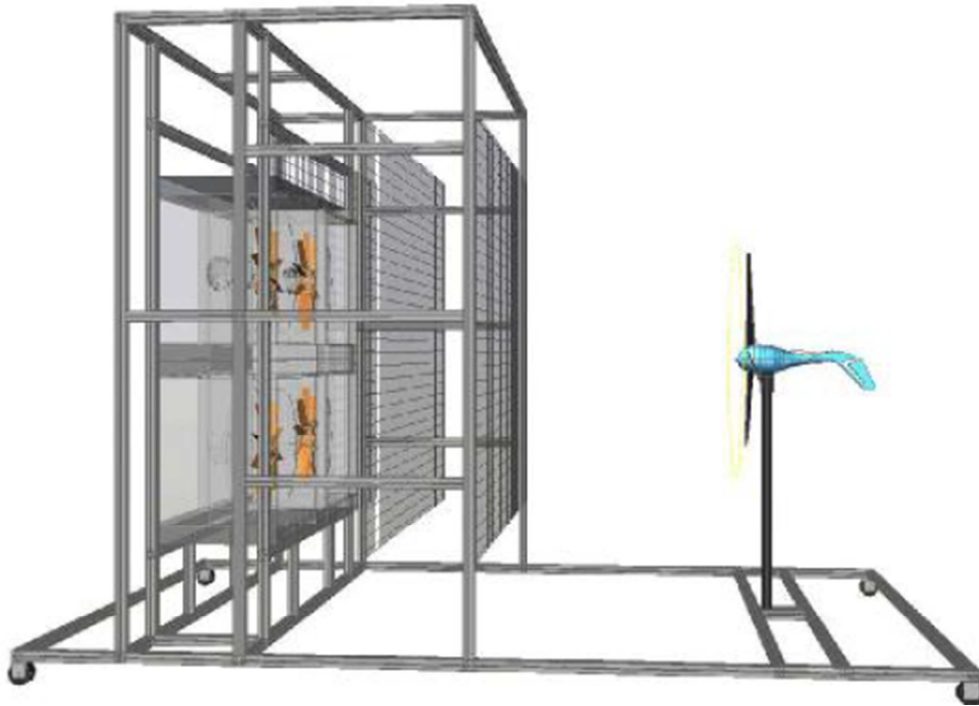


Figura 2.1. Vista en alzado del banco de ensayos

Los elementos fundamentales de la estructura son los elementos homogeneizadores del flujo de aire. En cualquier banco de ensayo, uno de los mayores retos es encontrar la mayor homogeneización de viento posible, ya que se genera una gran turbulencia de flujo de aire por el esfuerzo cortante del viento.

Para conseguir esta homogeneización de viento, se han instalado unos paneles de rejilla de aluminio, con secciones de paso de 50 mm x 50 mm. Por razones de seguridad, un panel de rejilla siempre será fijo, que es el que se dispone más cercano a los ventiladores.

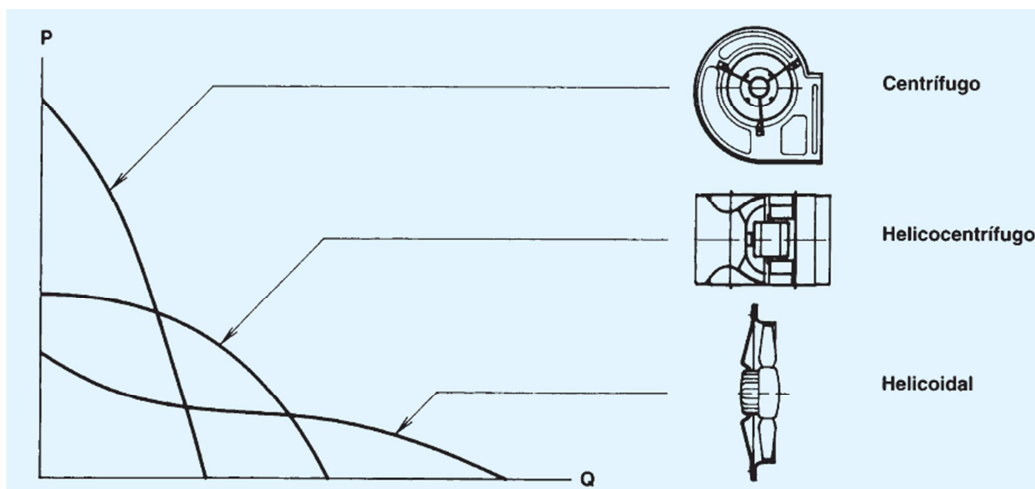
En el presente proyecto, se realizarán ensayos con un número de paneles de rejilla determinado, y además, se construirá una tobera para conducir el flujo hacia la sección de barrido del aerogenerador. Su desarrollo se encuentra en el Capítulo 3.

2.3. Actuadores: ventiladores y variadores de frecuencia

Para emular una velocidad de viento determinada se utilizan dos equipos: ventiladores y variadores de frecuencia. Los ventiladores serán los elementos encargados de generar el viento. Mientras que los variadores de frecuencia controlan la frecuencia de giro de dichos ventiladores de forma indirecta con la frecuencia eléctrica de sus motores.

2.3.1. Ventiladores

Los ventiladores instalados son de tipo helicoidal, capaces de mover un elevado caudal de aire con muy baja presión, y además transfieren la mayoría de energía en forma de presión dinámica.



Fuente: Catálogo Técnico Salvador Escoda S.A.

Figura 2.2. Curva característica P – Q de distintos tipos de ventiladores

Se disponen cuatro ventiladores modelo CJHCH – 56 – 4T – 2 de Sodeca, montados en dos filas horizontales dos a dos.



Fuente: Catálogo ventilador CJHCH – 56 – 4T – 2 de Sodeca

Figura 2.3. Ventilador helicoidal modelo CJHCH – 56 – 4T – 2 de Sodeca

Ventilador helicoidal modelo CJHCH – 56 – 4T – 2 de Sodeca	
Parámetro	Valor
Caudal máximo (m³/h)	15.300
Potencia (kW)	1,5
Intensidad máxima (A)	6,41 a 230 V
	3,70 a 400 V
Velocidad de giro (rpm)	1.450
Nivel de presión sonora (dBA)	72
Peso aproximado (kg)	59,3
Dimensiones (mm)	Ancho: 1.000
	Alto: 850
	Profundidad: 650

Tabla 2.1. Datos de ventilador helicoidal modelo CJHCH – 56 – 4T – 2 de Sodeca

Como los ventiladores están controlados por motores eléctricos asíncronos, se puede aplicar la ecuación fundamental de una máquina eléctrica, ya sea síncrona o asíncrona:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = p \cdot \omega_m = p \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \Rightarrow f = \frac{n \cdot p}{60}$$

ω = velocidad angular de la f.e.m. (rad/s) ; f : frecuencia de la f.e.m. (Hz)

ω_m = velocidad angular de giro del eje (rad/s) ; p = nº de pares de polos

n = r.p.m. de velocidad de giro de la máquina

Tal y como garantiza el fabricante, la velocidad de giro nominal es de 1.450 rpm. Si se hubiera sustituido la anterior ecuación el resultado sería 1.500 rpm para $f = 50$ Hz. Sin embargo, para máquinas asíncronas hay una reducción de velocidad de giro. En la bibliografía se ajusta a un 4 % menos. En cambio, en este caso consideraremos la diferencia de 50 rpm, siguiendo lo garantizado por el fabricante.

Cálculo de la velocidad de giro de ventiladores: n_{giro} y f_{giro}			
f (Hz)	$n_{síncrona}$ (rpm)	$n_{asíncrona} = n_{giro}$ (rpm)	f_{giro} (Hz)
13	390	340	5,67
12	450	400	6,67
20	600	550	9,17
25	750	700	11,67
30	900	850	14,17
35	1050	1000	16,67
40	1200	1150	19,17
45	1350	1300	21,67
50	1500	1450	24,17

Tabla 2.2. Cálculo de la velocidad de giro de los ventiladores

Destacar que durante todo el presente documento, se nombra a la frecuencia de la f.e.m. de los ventiladores como frecuencia de ventiladores a secas. No se refiere la frecuencia de giro de los ventiladores, porque este valor no es controlado por el usuario mediante los variadores de frecuencia. A la frecuencia de ventiladores se refiere en adelante al parámetro f de la anterior gráfica: **$f = f_{ventiladores}$ (Hz)**

2.3.2. Variadores de frecuencia

Se han instalado dos variadores de frecuencia modelo 3G3MX2-A4030-E de Omron, controlando cada uno de ellos dos ventiladores. Son trifásicos, alimentados a una tensión de 400 VCA, y con una potencia de salida máxima de motor aplicable de 3 kW:



Figura 2.4. Variadores de frecuencia 3G3MX2-A4030-E de Omron

Variador de frecuencia modelo 3G3MX2-A4030-E de Omron		
Parámetro	Valor	
Tamaño del motor aplicable (kW)	VT (*)	4,0
	CT (**)	3,0
Capacidad nominal (kVA) a 380 V	VT (*)	5,7
	CT (**)	4,7
Tensión nominal de entrada	Trifásica: 380 v – 15 % a 480 V + 10 %, 50/60 Hz ± 5 %	
Tensión nominal de salida	Trifásica: 380 a 480 V (proporcional a la tensión de entrada)	
Corriente nominal de salida (A)	VT (*)	8,8
	CT (**)	7,2
(*) VT = Ciclo de trabajo normal: 60 s a 120 %		
(**) CT = Ciclo de trabajo intenso: 60 s a 150 %		

Tabla 2.3. Datos de variador de frecuencia 3G3MX2-A4030-E de Omron

2.4. Sistema de medida: sensores, transductores y sistema de adquisición de datos

El sistema de medida es el encargado de la adquisición, procesamiento y distribución de datos. Los elementos que realizan todas estas funciones son: sensores, transductores y sistema de adquisición de datos.

2.4.1. Sensores y transductores

En un primer instante, es necesario obtener la magnitud física a medir (presión, temperatura, etc.) y convertirla a una señal eléctrica (tensión o intensidad). Esta función es realizada por los sensores. Los sensores deben tener salidas eléctricas de $[0 - 10]$ V y $[4 - 20]$ mA, para que el sistema de adquisición de datos pueda procesar los datos medidos. Si no se cumpliera esto, se necesita de transductores que acondicionen la señal eléctrica a los anteriores intervalos de intensidad y tensión.

2.4.1.1. Anemómetros de hilo caliente

Para medir la velocidad de viento se utiliza un total de tres anemómetros de hilo caliente modelo EE575 de E+E Elektronik.



Fuente: www.epluse.com

Figura 2.5. Anemómetro modelo EE575 de E+E Elektronik

Anemómetro modelo EE575 de E+E Elektronik	
Parámetro	Valor
Señal de salida (V)	$[0 - 10]$
Rango de medida (m/s)	$[0 - 20]$
Alimentación (VDC)	$[19 - 29]$
Longitud del cable (m)	2

Tabla 2.4. Datos de anemómetro modelo EE575 de E+E Elektronik

Se trata de un sensor activo, y que por lo tanto debe ser alimentado por una fuente externa. Para ello, se utilizan los transductores de tensión de 230 VAC a 24 VDC.

• Curva de calibración para anemómetro EE575 de E+E Elektronik

En primer lugar, se necesita conocer los valores de tensión correspondientes a los anemómetros que se recogen en el sistema de adquisición de datos cuando los ventiladores estén en reposo. Estos valores son denominados *valores de calibración*.

Para cada una de las posiciones definidas anteriormente sobre el plano horizontal, se adquieren unos determinados valores de calibración, que serán prácticamente análogos. Los valores de V_{punta} , V_{medio} y V_{eje} tienen unos valores de calibración de $[0,11 - 0,15]$ V. En el caso que no se den esos valores de tensión, los anemómetros están defectuosos, o bien, su cableado no es el adecuado.

Así, la ecuación que define la curva de los anemómetros EE575 de E+E Elektronik es:

$$V(m/s) = \left(\frac{20(m/s)}{10(V)} - V_{\text{calibración}} \right) \times (V_{\text{lectura}} - V_{\text{calibración}})$$

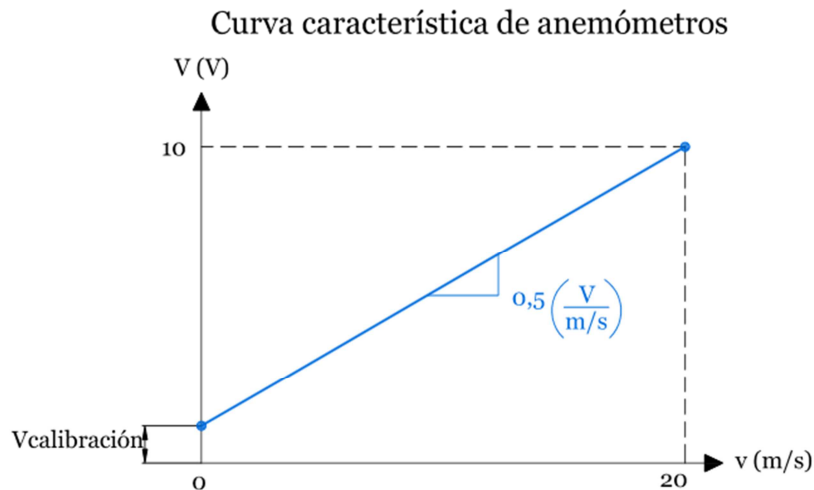


Figura 2.6. Curva de calibración para anemómetros

2.4.1.2. Sensor de temperatura

Para obtener la temperatura de ambiente a la que se encuentra el aerogenerador, se emplea una Pt100 y un transductor TxRail 4 – 20 mA del fabricante Novus.

• Pt100

Se trata de un sensor de temperatura de tipo resistivo, en el que se obtiene una señal de resistencia eléctrica según la temperatura:



Figura 2.7. Pt100

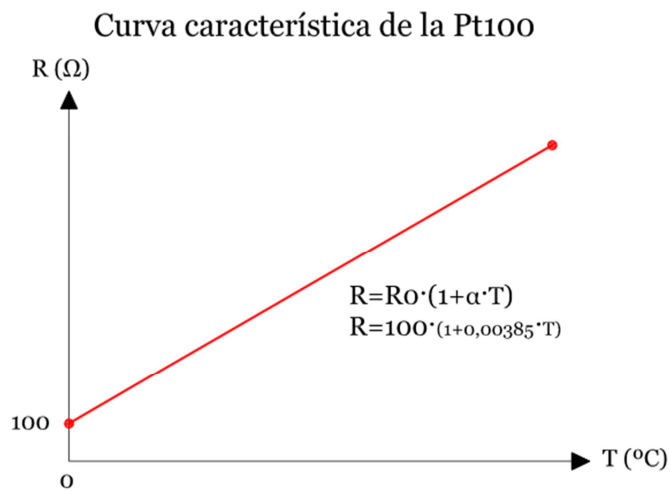


Figura 2.7. Curva de calibración para Pt100

• Transductor TxRail 4 – 20 mA

Por otro lado, se necesita de un convertidor hacia una salida reconocida por el sistema de adquisición de datos, siendo en este caso [4 – 20] mA. Partiendo de que el intervalo de entrada considerado en este convertidor es de [0 – 50] mV, su ecuación y curva característica es la siguiente:

$$T(^{\circ}C) = 3,125 \left(\frac{mV}{mA} \right) \times \left(I_{lectura} (A) \times \frac{1000 mA}{1 A} - 4 \right)$$

Recordar que: $R(\Omega) = \frac{V(V)}{I(A)} = \frac{V(mV)}{I(mA)}$

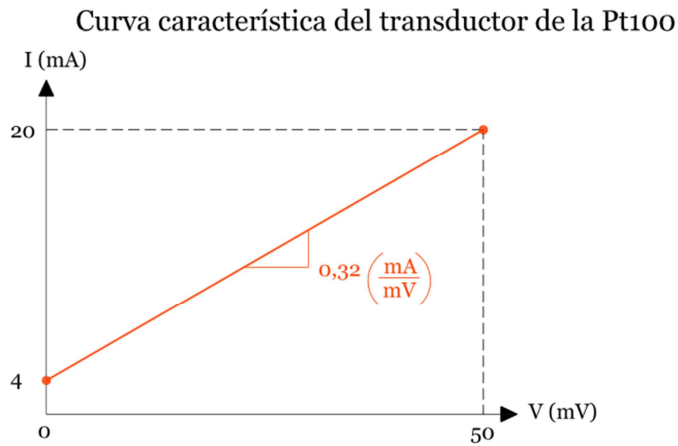


Figura 2.8. Curva de calibración para transductor de la Pt100

2.4.1.3. Sensor de presión

En el presente banco de ensayos se utiliza un barómetro electrónico, debido a su alta precisión y veracidad. El modelo utilizado de barómetro electrónico es el HD 9408T BARO de DELTA OHM.

Fuente: www.dimelco.com

Figura 2.9. Barómetro electrónico HD 9408T BARO de DELTA OHM

Barómetro electrónico HD 9408T BARO de DELTA OHM	
Parámetro	Valor
Señal de salida (V)	[0 – 10]
Rango de medida (mbar)	[800 – 1.100]
Alimentación (VDC)	[8 – 35]
Presión de sobrecarga (bar)	[2 – 3]
Tiempo de respuesta (ms)	< 200
Temperatura de trabajo (°C)	[-30 – 60]

Tabla 2.5. Datos de barómetro electrónico HD 9408T BARO de DELTA OHM

• **Curva de calibración para barómetro electrónico HD 9408T BARO de DELTA OHM**

Para este sensor no es necesario emplear un transductor para adaptar la señal a la entrada del sistema de adquisición de datos. Así, la salida del barómetro está dentro del rango de [4 – 20] mA:

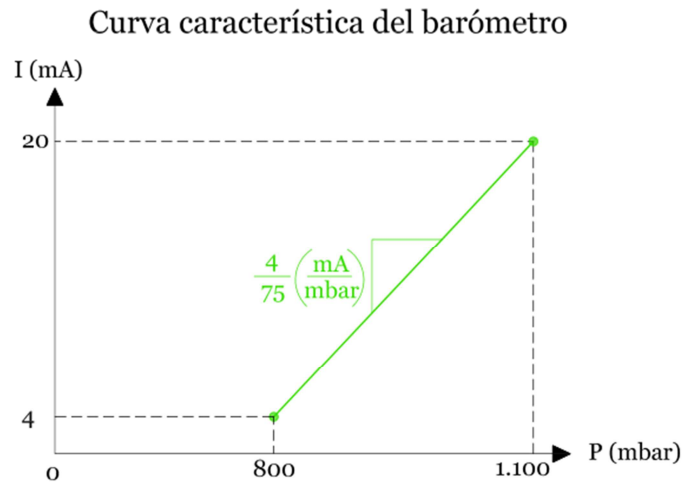


Figura 2.10. Curva de calibración para barómetro electrónico

Por lo tanto, si se despeja a presión barométrica de la ecuación anterior, se tiene lo siguiente:

$$P(\text{mbar}) = 18,75 \left(\frac{\text{mbar}}{\text{mA}} \right) \times \left(I_{\text{lectura}} (\text{A}) \times \frac{1000 \text{ mA}}{1 \text{ A}} - 4 \right) + 800 (\text{mbar})$$

2.4.1.4. Sensores de velocidad de giro

En el presente proyecto, se han utilizado dos formas de medir la velocidad de giro del aerogenerador:

- 1) **Captador de pulsos y convertidor de frecuencia.**
- 2) **Tacómetro óptico.**

1) Captador de pulsos y convertidor de frecuencia

En un primer instante se descartó los dispositivos que disponía la instalación para medir la velocidad de rotación:

- Sensor magnético modelo 1GT101DC de Honeywell, y
- Convertidor universal de frecuencia TACO flex.

En realidad, el sensor magnético modelo 1GT101DC de Honeywell si funciona correctamente.

Sin embargo, el convertidor universal de frecuencia TACO flex no es apropiado para bajas frecuencias. Destacar que en un aerogenerador de baja potencia, su velocidad de giro máxima estará en torno a 1000 rpm, o lo que es lo mismo, a 16,66 Hz. Dicho convertidor no era válido, ya que su frecuencia de corte, frecuencia a partir de la cual se filtra la señal de pulsos, es de 100 Hz. De tal forma que aún seleccionado el modo de trabajo de baja frecuencia de dicho convertidor, mide pulsos con frecuencia de 100 Hz a 15 KHz.

Como el rango de medida adecuado para medir la velocidad de giro en el banco de ensayos debe ser de $[0 - 1000]$ rpm, o equivalentemente, $[0 - 16,66]$ Hz, es necesario cambiar de convertidor. Además, también se sustituyó el captador de pulsos:

- **Captador de pulsos: BES M12MI – PSC40B – BVo3 de Balluff.**
- **Convertidor de frecuencia: TACO digi.**

• Captador de pulsos BES M12MI – PSC40B – BVo3 de Balluff

Es un sensor inductivo de tipo PNP, capta pulsos de frecuencia máxima de 300 Hz, y la distancia estándar de detección asignada por el fabricante es de 4 mm. Para ello, se ha acoplado un imán mediante un soporte adherido en la parte inferior de una de las palas. Además, el captador dispone de un LED que se enciende cada vez que envía un pulso al convertidor de frecuencia.

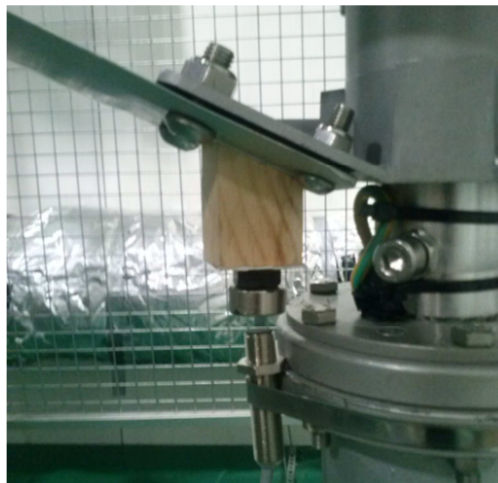


Figura 2.11. Captador de pulsos BES M12MI – PSC40B – BVo3 de Balluff

• Convertidor de frecuencia TACO digi

Para medir bajas frecuencias, como es el presente caso, se necesita un convertidor de frecuencia de gran precisión y estabilidad, y que disponga de un filtro estabilizador para bajas frecuencias. Por estos motivos, se ha elegido el convertidor de frecuencia TACO digi del fabricante DPF Sensors:



Fuente: Hoja de características de TACO digi

Figura 2.12. Convertidor de frecuencia TACO digi de DPF Sensors

• Curva característica convertidor de frecuencia TACO digi

Primero, se fija el tipo de salida de señal eléctrica del convertidor de frecuencia, que se asigna de $[4 - 20]$ mA. Al igual que en el caso de los anemómetros, el método de calibración es con respecto a dos puntos: sensibilidad (pendiente) y cero (offset):

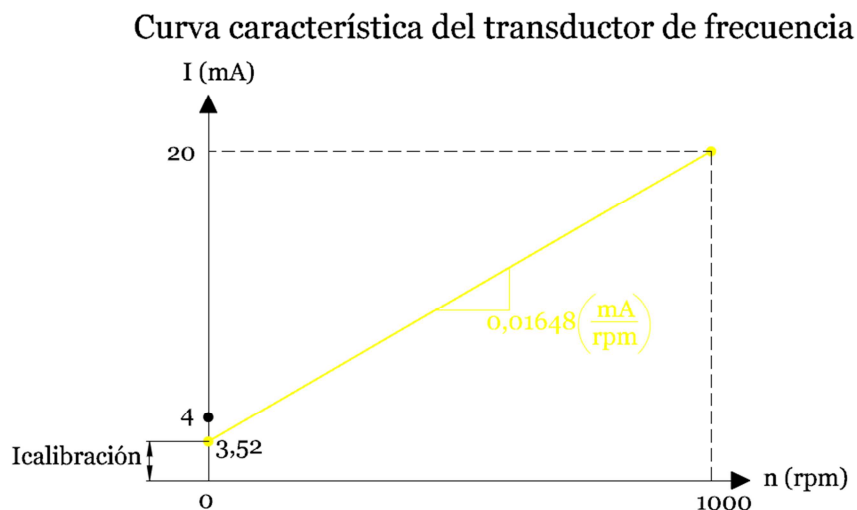


Figura 2.12. Curva característica de convertidor de frecuencia

Despejando la velocidad de giro, n , de la ecuación de la recta anterior:

$$n(rpm) = \left(\frac{(I_{lectura} - I_{calibración}) mA}{\frac{(20 - I_{calibración}) mA}{1000 rpm}} \right); \text{ Como se cumple que la } I_{calibración} \text{ es de } 3,52 \text{ mA:}$$

$$n(rpm) = \left(\frac{(I_{lectura} - 3,52) mA}{0,01648 (mA / rpm)} \right)$$

2) Tacómetro óptico

Se ha utilizado un tacómetro óptico modelo 1760/TC2 de Beta:



Fuente: www.betayemen.com

Figura 2.13. Tacómetro óptico modelo 1760/TC2 de Beta

Tacómetro óptico modelo 1760/TC2 de Beta	
Parámetro	Valor
Tiempo de medición (s)	0,8 (> 60 rpm)
Distancia para la detección (mm)	[50 – 500]
Funciones de medida	“UP” = Máximo “DN” = Mínimo “LA” = Último valor
Alimentación	4 baterías de 1,5 V (tipo AA) o directamente de la alimentación (6V, estable)

Tabla 2.6. Datos de tacómetro óptico modelo 1760/TC2 de Beta

Se ha utilizado este tacómetro para medir velocidad de giro del aerogenerador mientras se esperaba el pedido del captador y convertidor de frecuencia anterior, así como para comprobar la calibración de estos últimos.

2.4.1.5. Transductor de tensión

El transductor de tensión de esta instalación se emplea para medir la tensión continua que hay en bornes de batería. El sensor elegido es el MCR-VDC-UI-B-C del fabricante Phoenix Contact:



Fuente: Hoja de características de MCR-VDC-UI-B-C

Figura 2.14. Transductor de tensión MCR-VDC-UI-B-C

• Curva de calibración del transductor de tensión MCR-VDC-UI-B-C

La entrada de este transductor admite un rango de $[0 - 24]$ VDC. Mientras que su salida está acotada dentro del intervalo $[0 - 10]$ VDC. Además, como no existe ningún offset que modifique los 0 V en estado de tensión nula, la curva de calibración es la siguiente:

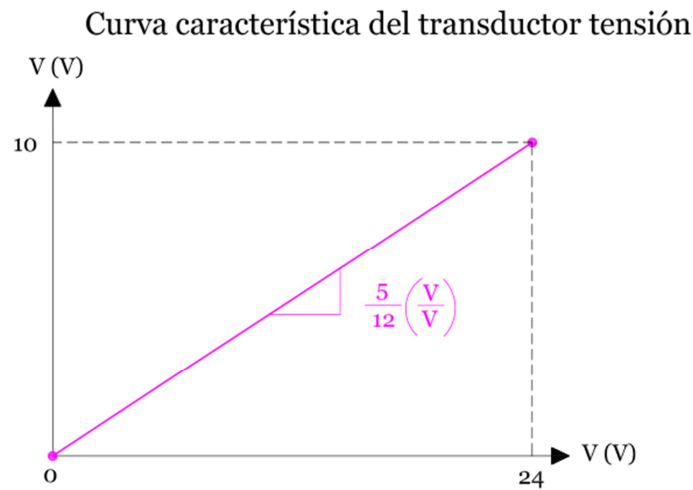


Figura 2.15. Curva de calibración del transductor de tensión

Despejando correctamente la ecuación de la recta anterior, se obtiene el valor de tensión real medido por este transductor:

$$V(V_{DC}) = 2,4 \times V_{lectura}(V_{DC})$$

2.4.1.6. Transductor de intensidad

Para el presente banco de ensayos se utiliza un transductor toroidal de efecto Hall para medir la intensidad que circula por la batería.

Este tipo de transductores está basado en el fenómeno electromagnético del “Efecto Hall”. Este proceso se produce cuando se ejerce un campo magnético transversal sobre un conductor por el que circula corriente eléctrica. Este campo magnético será producido por un núcleo magnético toroidal que dispone el transductor en su interior.

En nuestro caso, el transductor toroidal utilizado es el modelo DHR 100 C420 del fabricante LEM:

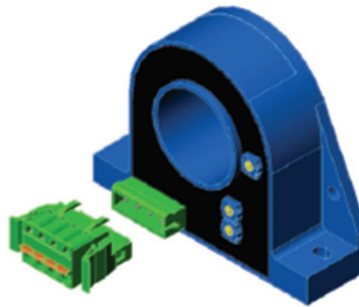


Figura 2.16. Transductor de intensidad DHR 100 C420 de LEM

Este transductor puede medir intensidades en alterna o en continua hasta un valor eficaz de 100 A.

Este valor sobrepasa en exceso el valor nominal de intensidad de los microaerogeneradores (<1 kW de potencia nominal). Partiendo de que este aerogenerador está conectado a una batería de 12 VDC, se estima que la intensidad continua en régimen nominal es:

$$P = V \cdot I \Rightarrow I = \frac{P}{V}$$

$$I = \frac{300 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 25 \text{ A}$$

Este valor de intensidad es el 25 % del valor máximo de intensidad que puede captar este transductor.

Debido a esto, y a que la precisión que asegura el fabricante de este transductor es $< \pm 1\%$ de 100 A, es decir, una precisión de $< \pm 1 \text{ A}$, es necesario comparar los resultados obtenidos con este transductor y con otros equipos de medida de intensidad: sonda de intensidad mediante osciloscopio, y multímetro digital (ver Capítulo 4).

• Curva de calibración del transductor de intensidad DHR 100 C420

El fabricante proporciona la curva de calibración de este transductor toroidal de efecto Hall para medida de intensidad:

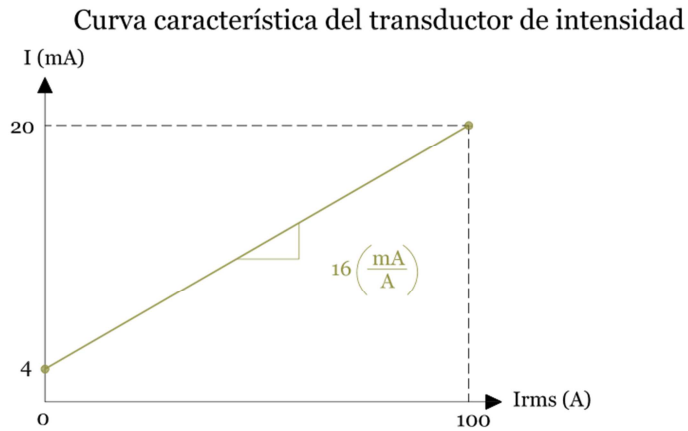


Figura 2.17. Curva de calibración de transductor de intensidad

Destacar que esta curva de calibración es para un único paso del conductor eléctrico por el transductor. Sin embargo, en la presente instalación el mismo conductor se hace pasar seis veces por el núcleo toroidal magnético de este transductor. Por lo tanto, la intensidad eficaz real se calculará dividiendo por seis el valor de la anterior curva de calibración:

$$I_{rms} (A) = \frac{1}{6} \times \left(\frac{I_{lectura} (A) - 0,004 (A)}{0,00016} \right)$$

De esta forma se aumenta la sensibilidad del sensor, intentando ajustarse lo más posible al campo de medida de intensidad de batería en los microaerogeneradores.

2.4.2. Sistema de adquisición de datos

En el presente banco de ensayos se utiliza un sistema centralizado de sistema de medida, en el que el núcleo es un registrador de datos, o más conocido, como data logger. Se utiliza este tipo de sistema de medida porque no hay muchas variables para medir, y las distancias entre sensores y núcleo son pequeñas.

El modelo empleado de data logger es el 34980A de Agilent Technologies, idóneo para aplicaciones donde se necesiten tomar un alto número de muestras con un reducido tiempo de muestreo. Este tiempo de muestreo está condicionado por la forma de funcionamiento interna del data logger: conmutación de relés.

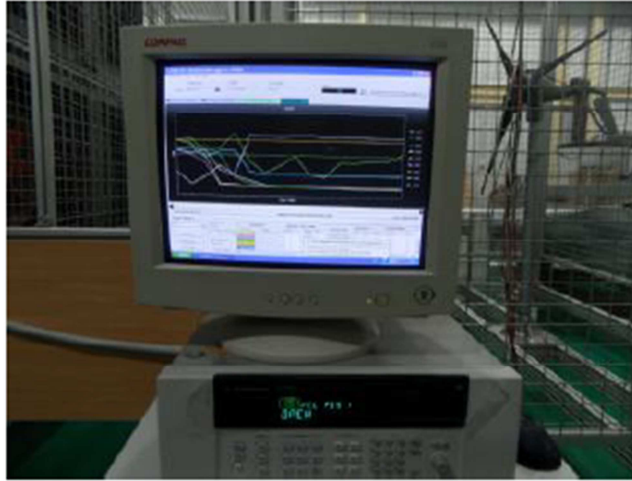


Figura 2.18. Data logger 34980A

El data logger dispone de un panel frontal con teclado para la configuración y la visualización de la toma de datos. Este panel frontal no es necesario saber manejarlo en profundidad, ya que la comunicación usuario – sistema de medida se establece mediante el software Benchlink Data Logger, o bien, a través de la aplicación creada en LabVIEW.

Sin embargo, el data logger no puede interpretar directamente las señales eléctricas que provienen de los sensores y transductores. Para ello, es necesario emplear una tarjeta multiplexora que agrupe todas las señales eléctricas recibidas por los sensores y transductores, y envíe todos esos datos al data logger en un único bus de comunicación.

Así, la tarjeta multiplexora utilizada es el modelo 34921A de Agilent Technologies. Esta tarjeta posee 40 canales de dos hilos, subdivididos en dos bancos de 20 canales cada uno. En el primer banco se encuentran los canales de 1 al 20, y en el segundo los canales del 21 al 40. Todos estos canales registran entradas de tensión. Mientras que para la toma de señales de intensidad, la tarjeta dispone de 4 relés adicionales, desde el canal 41 al 44.

Según el fabricante, este módulo puede muestrear hasta 100 canales por segundo. Por lo tanto, como en nuestro caso se utilizan un máximo de 8 canales, el periodo máximo de muestreo será:

$$T_{MIN_Muestreo} = \left(\frac{100 \text{ canales} / s}{8 \text{ canales}} \right)^{-1} = 0,08 \text{ s} = 80 \text{ ms}$$

$$\text{Entonces: } f_{MAX_Muestreo} = \frac{1}{T_{MIN_Muestreo}} = 12,5 \text{ Hz}$$

La frecuencia de muestreo de muestreo es elevada, pero nunca se podrá equiparar a la obtenida mediante una tarjeta de adquisición de datos electrónica, con la que por ejemplo podríamos medir valores de tensión e intensidad en alterna ($f_{muestreo} \geq 1\text{KHz}$).

En la siguiente tabla se adjunta un resumen de todos los componentes del sistema de medida, relacionando cada uno de ellos con el parámetro de medida:

SISTEMA DE MEDIDA: Sensores, transductores y sistema de adquisición de datos			
Parámetro a medir	Sensor y/o transductor	Canal/es en tarjeta multiplexora 34921A	Señal de salida de 34980A
Velocidad de viento	Anemómetros EE575 de E+E Elektronik	1001 (*); 1005; 1020; 1025	[0 – 10] V
Temperatura del ambiente	Sensor de temperatura Pt100 y transductor TxRail 4 – 20 mA de Novus	1043	[4 – 20] mA
Presión absoluta del ambiente	Barómetro electrónico HD 9408T BARO de DELTA OHM	1044	[4 – 20] mA
Velocidad de giro del aerogenerador	Captador de pulsos BES M12MI – PSC40B – BVo3 de Balluff y convertidor de frecuencia TACO digi del fabricante DPF Sensors:	1042	[4 – 20] mA
Tensión de batería	Transductor de tensión MCR-VDC-UI-B-C de Phoenix Contact	1036	[0 – 10] V
Intensidad de batería	Transductor toroidal de efecto Hall DHR 100 C420 de LEM	1041	[4 – 20] mA
(*) El canal 1001 no se utiliza en los ensayos del presente proyecto, aunque está habilitado para posteriores ensayos.			

Tabla 2.7. Relación entre parámetros, tarjeta multiplexora y data logger

2.5. Equipos auxiliares de medida de parámetros eléctricos

Los equipos auxiliares de medida de parámetros eléctricos empleados son:

- Multímetro digital.
- Osciloscopio digital: sonda diferencial de tensión y pinza amperimétrica.

2.5.1. Multímetro digital

El multímetro digital utilizado es el modelo *PD – 986* del fabricante *Promax*. Sus características eléctricas se describen en la siguiente tabla:

Características eléctricas multímetro PD – 986	
Impedancia	10 MΩ
Tensión CC	1.000 V
Tensión CA	750 V
Intensidad CC/CA	25 A
Resistencia	20 MΩ
Medida de valor RMS	




Tabla 2.8. Características eléctricas multímetro digital

2.5.2. Osciloscopio digital

El osciloscopio escogido es de tipo digital, por lo que utiliza un convertidor analógico – digital (A/D) para convertir la señal de entrada una señal digital. Una de las principales ventajas del osciloscopio digital con respecto al osciloscopio analógico, es que permite almacenar y estudiar transitorios y eventos no repetitivos en el tiempo.

El osciloscopio digital escogido para esta instalación es el modelo *DSO 8062* del fabricante *Voltcraft*:

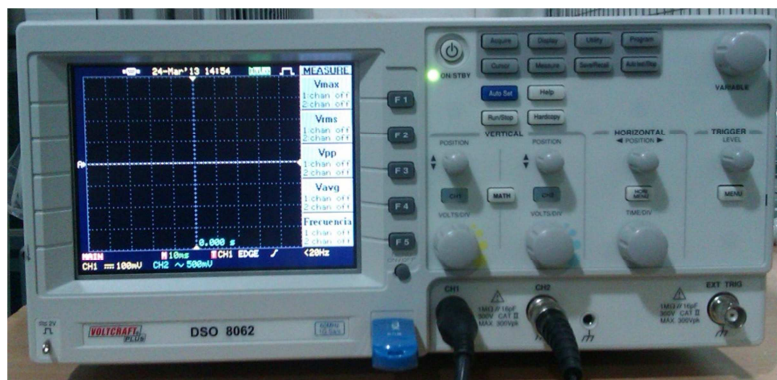


Figura 2.19. Osciloscopio digital

Este osciloscopio se emplea para medir tensión e intensidad, ambos valores tanto en alterna como en continua. Además, tanto para medida de tensión como para medida de intensidad, se podrán obtener valores característicos de la forma de onda obtenida. En el presente estudio se han fijado los siguientes valores característicos:

- 1) Valor máximo: V_{\max} .
- 2) Valor eficaz: V_{rms} .
- 3) Valor pico a pico: V_{pp} .
- 4) Valor medio: V_{avg} .
- 5) Frecuencia.

• Medida de tensión

Para medir tensión alterna o continua en cualquier osciloscopio, se necesita de una **sonda diferencial de tensión**. La sonda diferencial de tensión empleada es el modelo *MX 9030* con un ancho de banda de *30 MHz* del fabricante *Metrexx*:



Figura 2.20. Sonda diferencial de tensión

La escala utilizada en la sonda diferencial de tensión será “ $I/20$ ”, es decir, la tensión real se obtendrá multiplicando por 20 el valor mostrado en el osciloscopio. Que decir que la escala del canal del osciloscopio deberá permanecer “ $\times 1$ ”, para que se cumpla lo anterior.

• Medida de intensidad

Para medir intensidad tanto alterna como continua, se conecta la **pinza amperimétrica** a un canal del osciloscopio. La pinza amperimétrica que se utiliza en este caso es el modelo *E3N* del fabricante *Chauvin Arnoux*:



Figura 2.21. Pinza amperimétrica

La primera observación que hay que tener en cuenta antes de medir con la pinza amperimétrica, es calibrar la intensidad nula en el osciloscopio en modo de corriente continua, mediante la ruleta denominada “zero” en la pinza amperimétrica.

El paso siguiente es definir la escala. Se elige el rango 100 mV/A, es decir, 100 mV equivalen a 1 A de intensidad real. De forma análoga a la medida de tensión, el canal de intensidad deberá permanecer “x1”.

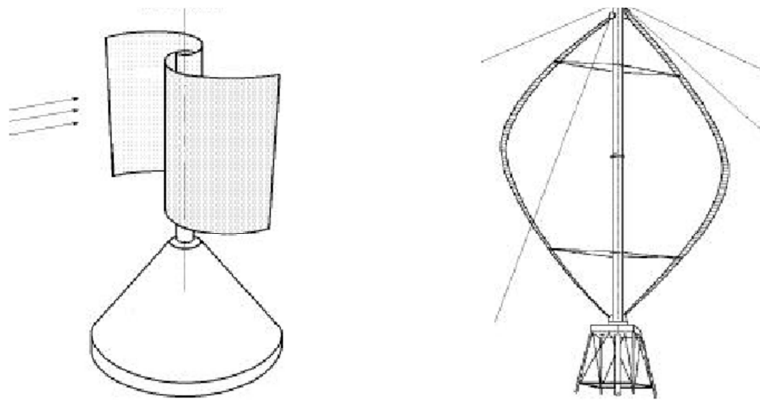
A continuación, se muestra una tabla resumen con las variables eléctricas a medir, y los equipos de medida correspondientes. Se muestran todos los equipos a excepción del multímetro, que puede medir cualquier valor de tensión e intensidad:

Medidas de parámetros eléctricos	
Variable eléctrica	Equipo de medida
I_{salida} (A)	Pinza amperimétrica, osciloscopio
V_{salida} (<i>fase – fase</i>) (V)	Sonda diferencial de tensión, osciloscopio
$I_{batería}$ (A)	Transductor de intensidad, Data Logger. Sonda diferencial de tensión, osciloscopio
$V_{batería}$ (V)	Transductor de tensión, Data Logger. Sonda diferencial de tensión, osciloscopio

Tabla 2.9. Variables y equipos de medida eléctricos

2.6. Aerogenerador

El aerogenerador ensayado en el presente proyecto es de tipo **vertical**, siendo un híbrido entre el tipo **Savonius** y el tipo **Darrieus**:



Fuente: <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/EnergiasAlternativas/eolica/PDFs/EOLO32002.pdf>

Figura 2.22. Aerogenerador Darrieus (derecha) y Savonius (izquierda)

El rotor *Savonius* tiene como principal ventaja trabajar a velocidades de viento muy bajas. Se compone de dos semicilindros de igual diámetro situados paralelamente al eje vertical de giro. La fuerza que el viento ejerce en las caras de los dos cilindros (cara cóncava y cara convexa) es distinta, por lo que se hace girar alrededor de ese eje.

El rotor *Darrieus* está formado por dos o tres palas de forma ovalada de perfil aerodinámico, y tienen características parecidas a las de eje horizontal, presentando un par de arranque muy pequeño.

• Ventajas de los aerogeneradores verticales sobre los horizontales:

- Debido a su orientación, no necesitan sistemas de orientación para alinear el eje de la turbina con la dirección del viento.
- Mantenimiento más sencillo.
- Debido a su poca altura con respecto al suelo y en el caso de que se trabaje a velocidad constante, no es necesario incorporar ningún mecanismo de cambio de paso, suponiendo un menor coste de la instalación.

• Inconvenientes de los aerogeneradores verticales sobre los horizontales:

- Necesidad de motor de arranque.
- Menor velocidad de giro.
- A igualdad de potencia, presentan un rendimiento menor.

El aerogenerador vertical tipo Savonius – Darrieus sometido a estudio en el presente proyecto se corresponde con el modelo comercial DS – 300. Sus principales características que garantiza el fabricante se muestran en la siguiente tabla:

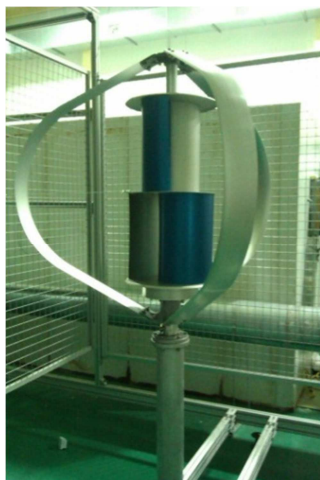


Figura 2.23. Aerogenerador DS – 300

Aerogenerador DS – 300	
Parámetro	Valor
Potencia nominal	300 W
Velocidades de viento para curva de potencia	Velocidad de arranque: 3 m/s
	Velocidad nominal: 13,5 m/s
	Velocidad de freno: 15 m/s
	Velocidad de supervivencia: 60 m/s
Velocidad de giro nominal	835 rpm
Tipo de generador	Generador síncrono trifásico de imanes permanentes

Tabla 2.10. Características principales de aerogenerador DS – 300

Además, el fabricante del aerogenerador ofrece un controlador de potencia, que a fin de cuentas es un rectificador de puente de diodos (véase Capítulo 4). Se corresponde con el modelo WGo400 y será un elemento muy importante en el rendimiento eléctrico del aerogenerador, tal y como se justifica en el Capítulo 4.

Controlador WGo400		
	Parámetro	Valor
	Potencia nominal	400 W
	Tipo de batería aplicable	12 VDC/100AH/150AH/200AH
	Tensión de entrada	[0 – 50] V
	Tensión e intensidad de entrada nominal	28 V/ 15 A
	Tensión de carga (Inicio/Paro) a la entrada	6 V/ 4 V
	Eficiencia	> 92 %
	Tensión de protección	13,8 VDC ± 0,5 V
	Tensión de descarga	11,5 VDC ± 0,5 V

Tabla 2.11. Características principales de controlador WGo400

2.7. Otros equipos

Hay que incluir los dos últimos equipos característicos de la instalación eólica:

- **Batería.**
- **Inversor.**

2.7.1. Batería

La batería es utilizada para acumular la energía eléctrica generada por el aerogenerador, o bien, suministrar electricidad a una carga en continua. La batería utilizada es de *plomo y ácido*, con una tensión nominal de 12 V y una capacidad de carga de 256 Ah . Se corresponde con el modelo EnerSol 250 del fabricante Exide. Para más información acerca del principio de funcionamiento de dicha batería véase el capítulo 4.



Fuente: www.renovablesonline.es

Figura 2.24. Batería EnerSol 250 de Exide

2.7.2. Inversor

El inversor es un equipo electrónico que convierte la señal eléctrica de entrada en continua a una señal eléctrica de salida en alterna. Es muy utilizado en instalaciones eólicas, ya que en numerosas ocasiones hay que abastecer cargas eléctricas alternas. Así, la energía acumulada en la batería puede ser aprovechada por cargas eléctricas alternas, conectando el inversor aguas debajo de la batería. En el presente proyecto no se va a utilizar este equipo.



Fuente: www.victronenergy.com

Figura 2.25. Inversor Phoenix Inverter 12/1200 de Victron Energy

Capítulo 3

Análisis del comportamiento fluido – mecánico y eléctrico – mecánico del aerogenerador

3.1. Introducción

En el presente capítulo se realiza la toma de medidas de velocidad de viento, presión y temperatura; análisis de perfiles de velocidades de viento; y estudio eléctrico – mecánico del aerogenerador DS – 300.

Para ello, se tomarán los siguientes escenarios:

1) Ensayos con rejilla intermedia.

- Perfil izquierdo de velocidades.
- Perfil completo de velocidades.

2) Ensayos sin rejilla intermedia.

- Perfil izquierdo de velocidades.

3) Ensayos con tobera reductora.

- Perfil completo de velocidades.

3.2. Planificación de los ensayos

A continuación, se describirán las condiciones en las que se llevan a cabo los ensayos al aerogenerador DS – 300.

3.2.1. Configuración de elementos homogeneizadores de flujo

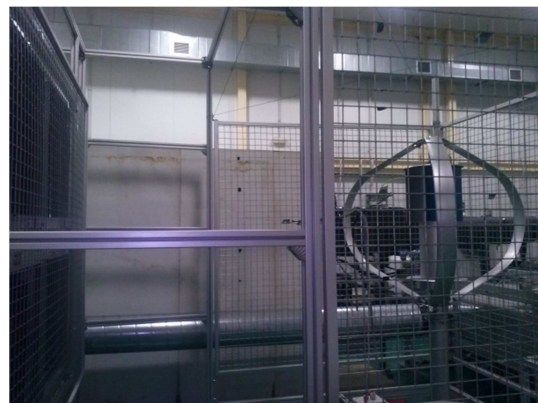
Los ensayos para la obtención del perfil de viento se realizan para una situación concreta de los elementos homogeneizadores de flujo. Por un lado, se dan dos tipos de ensayos, según la presencia o no del panel de rejilla intermedio, el cual se encuentra entre el aerogenerador DS300 y el panel de rejilla que protege a los ventiladores:

a) Ensayos con panel de rejilla intermedio.

b) Ensayos sin panel de rejilla intermedio.



a) Con panel de rejilla.



b) Sin panel de rejilla.

Figura 3.1. Situaciones de paneles de rejilla

Los **resultados de los ensayos con panel de rejilla intermedio serán comparados con los resultados obtenidos previamente por otro alumno** en esta misma situación de rejillas.

Finalmente, se instala una tobera reductora con forma de prisma rectangular, cuyo objetivo principal es aumentar la velocidad de viento recibido por el aerogenerador sin necesidad de tener que instalar unos ventiladores de mayor potencia eólica.

Después de medir las velocidades de viento con la tobera reductora y sin la presencia de ningún panel de rejilla entre ventiladores y aerogenerador, se concluyó que la velocidad de viento no era lo suficientemente homogénea para llevar a cabo su estudio. Por lo tanto, se interpone un panel de rejilla entre dicha sección y el aerogenerador DS – 300. Para ver la situación de la tobera en el banco de ensayos, véase la figura 3.3.

• Diseño de tobera reductora

Se instala una tobera reductora rectangular, cuya sección inicial comience en los ventiladores, y finalice lo más próxima posible al aerogenerador, con una sección de salida que abarque la sección de barrido del aerogenerador DS – 300.

Tras aplicar los anteriores criterios de diseño, y por seguridad, mayorar en un pequeño porcentaje el área rectangular que abarca el área de barrido del aerogenerador DS – 300, la tobera reductora sigue las siguientes medidas:

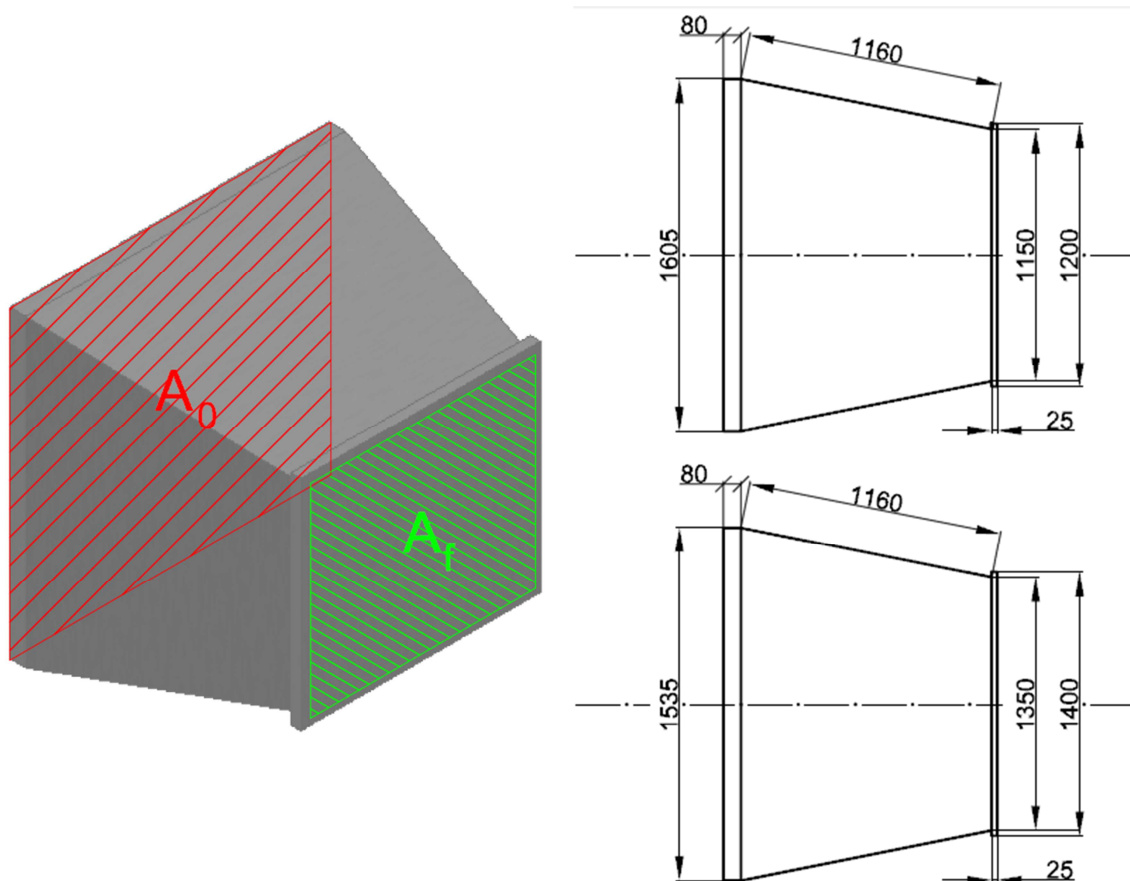


Figura 3.2. Dibujos en 3D y 2D de tobera reductora

Con esta tobera se consigue conducir el flujo de aire hacia la sección de barrido del aerogenerador DS – 300. Así, se disminuyen casi a la totalidad el flujo de viento que no llega hacia dicha sección.

Además, al haber una reducción de sección de paso del fluido, se consigue aumentar la velocidad de viento que es recibida por este aerogenerador. En la situación inicial, se puede asignar una sección de paso de A_0 correspondiente a los ventiladores, aunque ya se ha dicho que hay muchas pérdidas de flujo hacia los extremos. Con la tobera, hay una importante reducción de la sección de flujo, siendo ahora A_f :

$$\frac{A_0}{A_f} = \frac{2,464 \text{ m}^2}{1,553 \text{ m}^2} \approx 1,59 \Rightarrow \boxed{A_0 \approx 1,6 \times A_f}$$

Así, **teóricamente, la velocidad debería aumentar en aproximadamente un 60 % con respecto al caso anterior.** En el Capítulo 3 se justificará que sí que sucede aproximadamente este hecho.

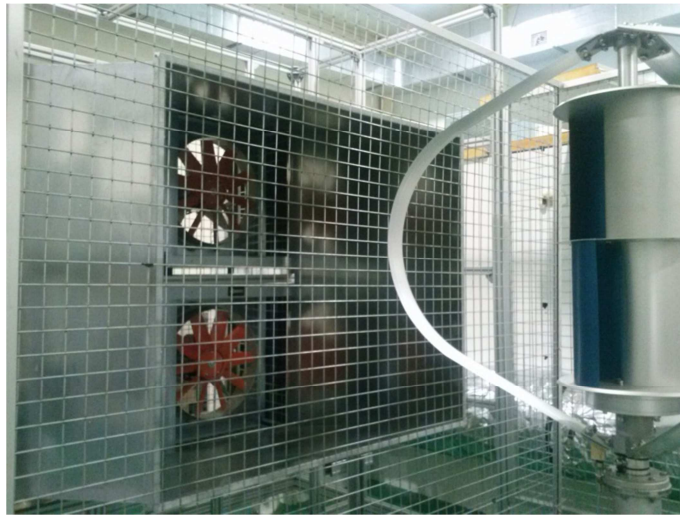


Figura 3.3. Situación de tobera reductora

3.2.2. Medidas de velocidad de viento

En una primera serie de ensayos se miden las velocidades de viento en el perfil izquierdo del aerogenerador DS300. Es decir, si se miran de frente a los ventiladores, se posicionan los anemómetros en el lado izquierdo:

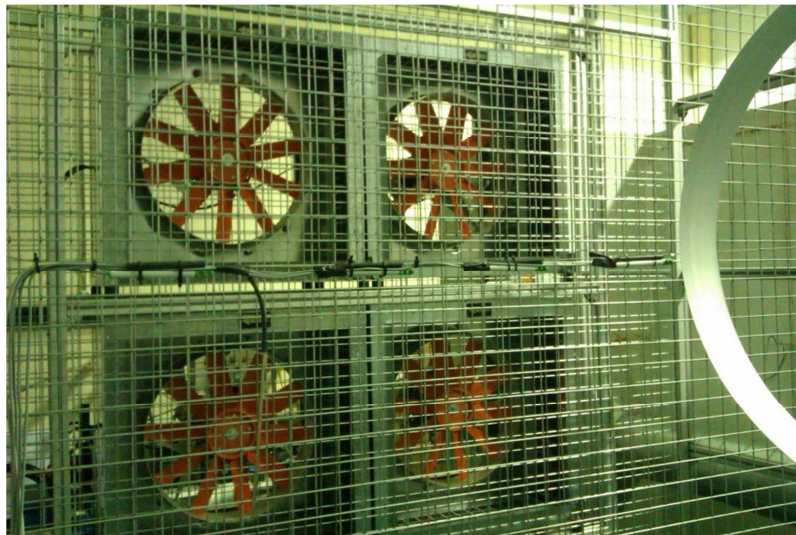


Figura 3.4. Posición de anemómetros en perfil izquierdo

Una vez completado el perfil de velocidades de viento sobre el perfil izquierdo del aerogenerador DS300, puede ser completado, si se requiere, con los valores de velocidad de viento obtenidos en el perfil derecho.

En un único ensayo sólo se pueden tomar tres valores de velocidad de viento, ya que cómo máximo, se disponen de tres anemómetros, dispuestos en el plano horizontal de la siguiente forma:

- Anemómetro “Eje”. Situado a la altura del eje del aerogenerador. Sus medidas estarán representadas por v_{eje} . Este anemómetro sólo es utilizado en el perfil derecho.
- Anemómetro “Medio”. Situado a 30 cm del centro del eje del aerogenerador. Sus medidas estarán representadas por v_{medio} .
- Anemómetro “Punta”. Situado a 60 cm del centro del eje del aerogenerador. Sus medidas estarán representadas por v_{punta} .

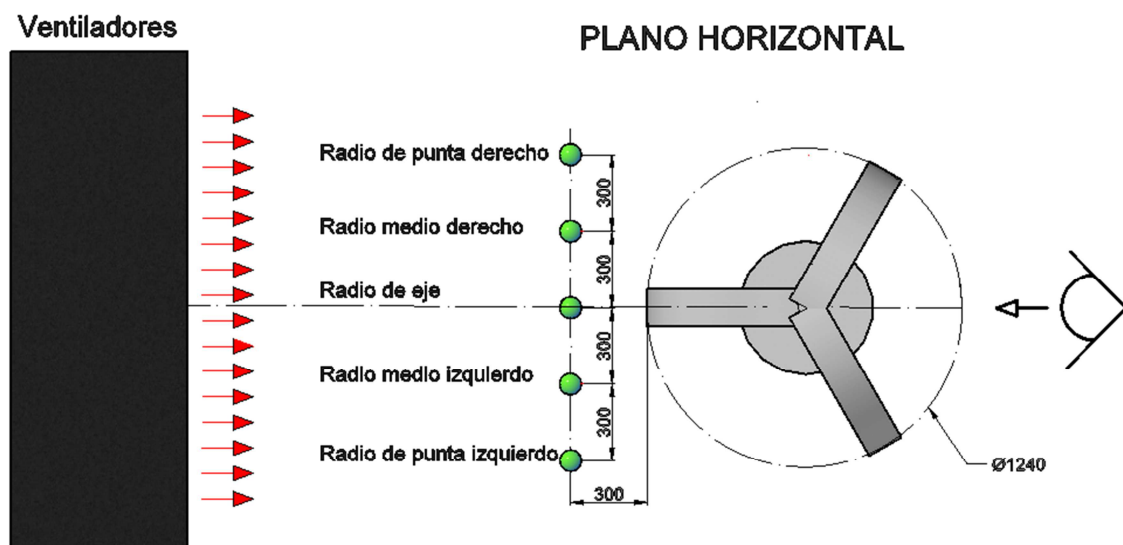


Figura 3.5. Vista de planta de aerogenerador DS300 y niveles de muestreo en plano horizontal

Para hacer un completo barrido de valores de velocidad de viento en un área determinada, se definen cinco puntos sobre el plano vertical:

- Posición 0: anemómetros situados en el centro del eje de aerogenerador, coincidente con el centro geométrico de la pala. Posición central.
- Posición 1: anemómetros situados 25 cm por encima del centro del eje del aerogenerador. Posición intermedia superior.
- Posición 2: anemómetros situados 50 cm por encima del centro del eje del aerogenerador. Posición superior.
- Posición -1: anemómetros situados 25 cm por debajo del centro del eje del aerogenerador. Posición intermedia inferior.
- Posición -2: anemómetros situados 50 cm por debajo del centro del eje del aerogenerador. Posición inferior.

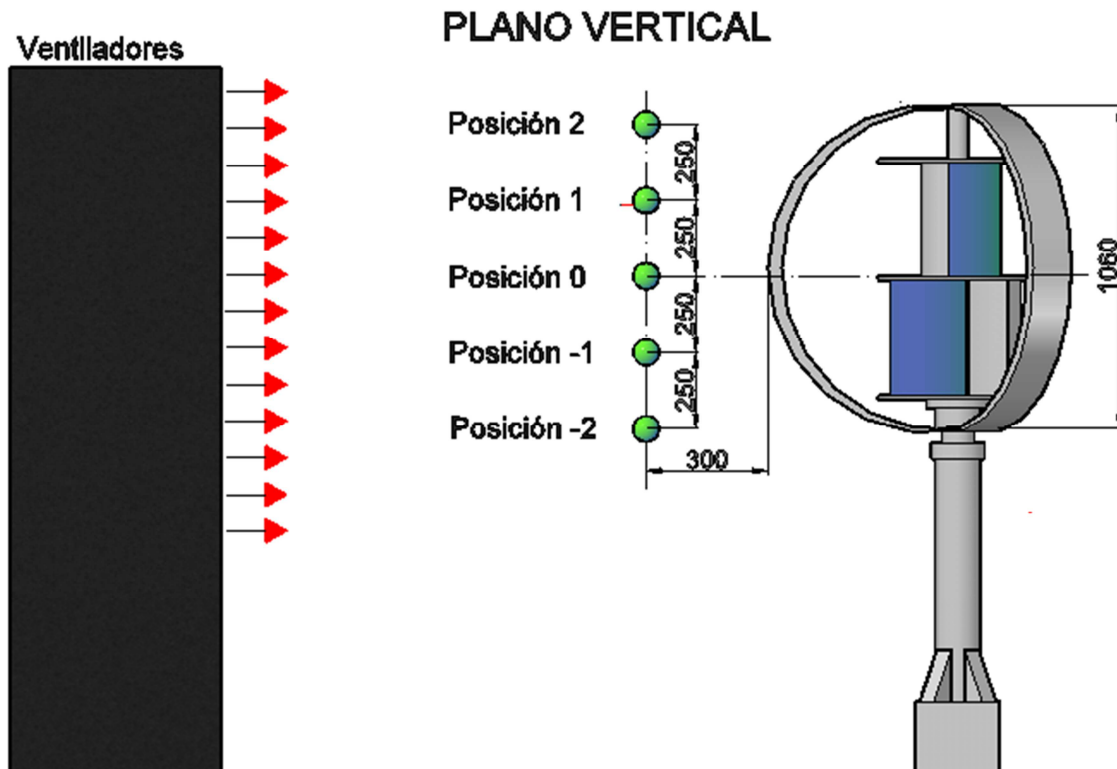


Figura 3.6. Vista de perfil de aerogenerador DS300 y niveles de muestreo en plano vertical

• **Excepción: Medida de velocidad de viento con tobera reductora**

Los ensayos con y sin rejilla intermedia, cuya situación de rejilla es ilustrada en la figura 3.1, siguen el esquema de medida de anemómetros descritos en las dos figuras anteriores.

Sin embargo, hay una pequeña variación en la posición de los sensores de flujo de aire cuando se instala la tobera reductora. Estas modificaciones son debidas a las dimensiones de la tobera y de la posición final con respecto al aerogenerador DS – 300.

En el plano horizontal, la posición que obliga al cambio de distancias entre anemómetros es **el radio de punta**. Si instalamos dicho anemómetro en la misma posición anterior, quedaría muy próximo al extremo de la tobera, por lo que daría una velocidad de viento muy inferior a los otros dos anemómetros. Las diferencias son:

- Anemómetro “Medio”, V_{media} . Situado a 25 cm del centro del eje del aerogenerador.
- Anemómetro “Punta”, V_{punta} Situado a 50 cm del centro del eje del aerogenerador.

En el plano vertical, hay que modificar la **Posición 2**, concretamente bajarla 10 cm. Si se deja en la misma posición anterior, los tres anemómetros estarían a la misma altura que el canto superior de la tobera reductora. Si se quedara así, las medidas de velocidad de viento no serían correctas. La modificación sería:

- Posición 2: anemómetros situados 40 cm por encima del centro del eje del aerogenerador.

3.2.3. Medidas de temperatura y presión absoluta

Importante destacar que la potencia eólica es directamente proporcional a la densidad del aire. Éste parámetro en un lugar dado, es inversamente proporcional a la temperatura ambiente y directamente proporcional a la presión atmosférica. De ahí que sea condición casi indispensable medir estas dos variables físicas.

De tal forma que se considera un valor promedio de presión barométrica y temperatura para calcular la densidad del aire en cada uno de los ensayos.

3.2.4. Selección de frecuencia de la f.e.m. de ventiladores

En primer lugar, se ensaya cual es la frecuencia eléctrica mínima de los cuatro ventiladores que hace rotar al aerogenerador DS – 300 en el caso con rejilla intermedia. Esta frecuencia es de 13 Hz. En el siguiente capítulo, se comprobará si esta frecuencia de f.e.m. de ventiladores es suficiente para que genere electricidad en todos los escenarios.

La siguiente frecuencia seleccionada en los ventiladores es de 15 Hz, y se continúa con los ensayos aumentando la frecuencia en intervalos de 5 Hz, hasta llegar a la frecuencia máxima de ventiladores de 50 Hz. En resumen, los ensayos para conseguir el perfil de velocidades de viento son a las siguientes frecuencias de la f.e.m. de ventiladores:

[13, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50] Hz

3.2.5. Parámetros de ensayo

Como se considera que los datos obtenidos por los distintos sensores siguen una distribución normal, su valor representativo será la media aritmética de todos los datos obtenidos durante el tiempo de ensayo. Por esta razón, es necesario un número de muestras elevado, y además, se precisa que sea el menor tiempo posible de ensayo:

- *Tiempo de ensayo:* **60 s.**
- *Intervalo de tiempo entre cada muestra:* **500 ms.**
- *Número total de muestras:* **120 muestras.**

3.3. Cálculos justificativos

3.3.1. Cálculo de la densidad del aire, ρ_{aire}

Para calcular la densidad del aire para cada una de las velocidades de viento, y para cada una de las posiciones en el plano vertical de los anemómetros, se aplica la “Ecuación de los gases perfectos”:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

En donde:

p = presión absoluta

V = volumen del gas

n = moles de gas

R = constante universal de los gases ideales

T = temperatura absoluta

Como el número de moles de gas se puede expresar como la masa del gas (m), dividido por su masa molar (M), se tiene otra expresión equivalente de la “Ecuación de los gases perfectos”:

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

Además, si se despeja el volumen a partir de la definición de densidad (ρ), se tiene la “Ecuación de los gases perfectos” siguiente:

$$\frac{p \cdot M}{R \cdot T} = \frac{m}{V}; \text{ Si } \rho = \frac{m}{V}, \text{ se tiene que: } \rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$$

Esta última ecuación será la que se utilice para calcular la densidad del aire, de la cual hay dos valores constantes:

$$R = 8,314 \frac{J}{mol \cdot K}; \quad M = M_{\text{aire seco}} = 28,97 \text{ g/mol} = 0,02897 \text{ kg/mol}$$

$$\text{Estas dos constantes se pueden juntar en una sola: } R_{\rho} = \frac{R}{M_{\text{aire seco}}} \approx 287 \frac{J}{kg \cdot K}$$

Entonces la “Ecuación de los gases perfectos” es la siguiente:

$$\rho = \frac{p}{R_{\rho} \cdot T}$$

Además hay que considerar el cambio de unidades de presión y temperatura:

$$p(Pa) = p(mbar) \times \frac{100(Pa)}{1(mbar)}; \quad T(K) = T(^{\circ}C) + 273,15$$

Las unidades para la medida de densidad del aire se justifican a continuación:

$$[\rho] = \frac{\left(\frac{Pa}{kg \cdot K}\right)}{\left(\frac{J}{kg \cdot K}\right)}; \quad \text{Si } [Pa] = \left(\frac{N}{m^2}\right) \text{ y } [J] = (N \cdot m)$$

$$[\rho] = \frac{\left(\frac{N}{m^2}\right)}{\left(\frac{(N \cdot m)}{kg \cdot K}\right)} = \left(\frac{kg}{m^3}\right)$$

Contrastar los valores obtenidos con el valor estándar de densidad a nivel del mar:

$$\rho_o = 1,225 \text{ kg/m}^3; \quad 1013 \text{ mbar, aire seco, } 15^{\circ}C$$

3.3.2. Cálculo de la potencia eólica, P_o

El parámetro de potencial eólico determina la potencia que experimenta un rotor aerodinámico de eje horizontal por unidad de área de barrido:

$$\frac{P_o}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

En nuestro caso, el aerogenerador es de eje vertical, por lo que la anterior definición de potencial eólico no sería válida. Así, se definirá la potencia eólica teórica disponible como:

$$P_o = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \text{ (W)}$$

Véase que la potencia del viento es directamente proporcional al cubo de su velocidad y, por ejemplo, si la velocidad del viento se duplica, su potencia es 8 veces mayor.

Notar que este parámetro es fácil de calcular a partir de los datos de densidad del aire y velocidad del aire en cada uno de los ensayos realizados. El único parámetro que queda por calcular sería el área barrida por el aerogenerador vertical.

3.3.3. Cálculo del área barrida por el aerogenerador DS – 300

El área barrida del presente aerogenerador vertical se correspondería al área rayada de la siguiente figura:

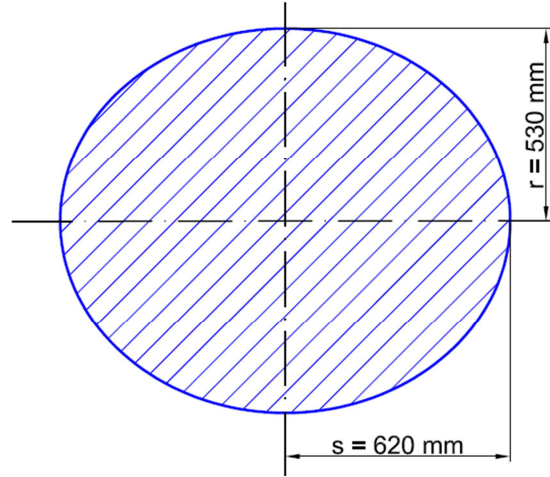


Figura 3.7. Área barrida por el aerogenerador DS – 300

Como la forma de área barrida se aproxima al área cerrada por una elipse, y si se atiende a los parámetros 'r' y 's' de la anterior figura, el área barrida se calcula como:

$$A = \pi \cdot r \cdot s$$

Se obtiene que: $A \approx 1,03 \text{ m}^2$

3.3.4. Cálculo del coeficiente de potencia, C_p

La fracción de la energía del viento que una turbina, en este caso aerogenerador, convierte a energía mecánica de rotación se denomina Coeficiente de Potencia, C_p de esa turbina:

$$C_p = \frac{P_{\text{mecánica}}}{P_{\text{eólica}}}$$

Si consideramos que el rendimiento eléctrico del presente aerogenerador es del 100 %, se cumple que:

$$\eta_{\text{eléctrico}} (\%) = \frac{P_{\text{eléctrica}}}{P_{\text{mecánica}}} = 100 \% \Rightarrow P_{\text{eléctrica}} = P_{\text{mecánica}}$$

En consecuencia, como se mide la potencia eléctrica generada a la salida del aerogenerador, se puede calcular el coeficiente de potencia:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \approx 3 \cdot p(t)_{\text{fase}} (W)$$

En el capítulo siguiente se desarrolla el cálculo de la potencia eléctrica detallado.

Así, tal y como se calculaba la potencia eólica en el apartado nº8, se tiene que:

$$C_p = \frac{P_{\text{eléctrica}}}{P_{\text{eólica}}} = \frac{P}{P_o}$$

3.3.5. Cálculo de la velocidad específica, λ

La velocidad específica, λ , es uno de los parámetros de diseño más importante en cualquier tipo de turbomáquina. En un aerogenerador, se define como la relación entre la velocidad lineal en la punta de la pala (v_i) y la velocidad de viento (v) recibida:

$$\lambda = \frac{v_i}{v} = \frac{\omega \cdot r_i}{v}$$

En donde r_i se fija como el máximo posible en el presente aerogenerador, y que según la figura anterior es: $r_i = 0,62$ m. Además, ω es la velocidad angular del aerogenerador, calculada indirectamente a través de las revoluciones por minuto (n). De tal forma que λ se calcula como:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot r_i}{v} = \frac{\left(\frac{\pi}{30} \cdot n \right) \cdot 0,62}{v}$$

Una vez obtenidos C_p y λ , ya es posible trazar la curva del coeficiente de potencia, obteniendo valores distintos de éstos para cada velocidad de viento. Esta curva tiene el objetivo fundamental de visualizar la eficiencia mecánica del aerogenerador con respecto a la velocidad de viento, para así identificar la velocidad de viento nominal (según λ) a la que se obtiene el rendimiento máximo (máximo C_p).

3.4. Ensayos con rejilla intermedia y perfil izquierdo

3.4.1. Comprobación de la bondad en las medidas

Uno de los primeros objetivos del presente proyecto es certificar la bondad de las medidas de velocidad de viento tomadas por los anemómetros. Para ello, se compara con medidas obtenidas en otro proyecto en el mismo banco de ensayos. Éstas últimas medidas se muestran en rojo y entre paréntesis.

Destacar que se han obtenido un total de 15 puntos de velocidad de viento para cada una de las frecuencias de ventiladores asignadas, siendo suficiente información para contrastar la bondad de las mediciones obtenidas.

Además de las velocidades de viento, para cada uno de los ensayos realizados se obtienen temperatura y presión absoluta:

Ensayos sin rejilla intermedia: Perfil izquierdo de velocidades viento					
50 Hz	v_{punta_izq} (m/s)	v_{medio_izq} (m/s)	v_{eje} (m/s)	Temperatura (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	6,95 (4,56)	9,22 (8,37)	6,82 (9,06)	15,6	1020,2
Posición 1	7,20	7,85	6,38	15,7	1019,8
Posición 0	6,81 (9,13)	8,16 (8,57)	6,91 (8,14)	15,9	1019,1
Posición -1	7,47	9,31	4,35	14,2	1019,2
Posición -2	10,44 (9,42)	9,47 (9,54)	8,16 (6,57)	13,9	1019,6
45 Hz	v_{punta_izq} (m/s)	v_{medio_izq} (m/s)	v_{eje} (m/s)	Temperatura (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	7,13	7,63	5,64	15,8	1024,0
Posición 1	7,12	7,39	5,72	15,7	1023,4
Posición 0	6,30	7,19	6,01	16,0	1022,8
Posición -1	7,10	8,39	3,77	14,2	1022,9
Posición -2	9,58	8,90	7,29	13,9	1023,4
40 Hz	v_{punta_izq} (m/s)	v_{medio_izq} (m/s)	v_{eje} (m/s)	Temperatura (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	6,20 (4,46)	7,02 (7,43)	4,45 (7,74)	15,8	1024,3
Posición 1	6,19	6,66	4,35	15,8	1023,5
Posición 0	5,87 (7,74)	6,10 (7,68)	4,80 (6,69)	16,2	1022,6
Posición -1	5,75	8,14	3,05	14,3	1022,8
Posición -2	8,47 (8,40)	7,70 (6,99)	6,15 (4,38)	14,0	1023,3

Tabla 3.1. Resultados perfil izquierdo I (P. Izquierdo Con Rejilla)

Velocidad, temperatura y presión. Perfil izquierdo con rejilla intermedia					
35 Hz	v_{punta_izq} (m/s)	v_{medio_izq} (m/s)	v_{eye} (m/s)	Temperatura (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	5,36	6,14	3,41	15,9	1023,0
Posición 1	5,79	5,76	3,24	15,9	1023,6
Posición 0	5,07	5,95	3,90	16,4	1022,3
Posición -1	5,50	6,82	3,09	14,3	1022,5
Posición -2	7,53	6,70	4,44	14,0	1022,9
30 Hz	v_{punta_izq} (m/s)	v_{medio_izq} (m/s)	v_{eye} (m/s)	Temperatura (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	5,11 (3,25)	5,12 (5,51)	2,34 (5,61)	15,9	1020,1
Posición 1	4,94	4,77	2,24	16,1	1023,2
Posición 0	3,83 (5,92)	4,84 (5,58)	3,06 (5,05)	16,6	1022,2
Posición -1	4,11	6,36	2,22	14,4	1022,5
Posición -2	6,50 (6,49)	6,14 (6,27)	3,36 (4,73)	14,2	1023,0
25 Hz	v_{punta_izq} (m/s)	v_{medio_izq} (m/s)	v_{eye} (m/s)	Temperatura (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	4,32	4,04	1,69	16,1	1023,9
Posición 1	3,76	3,51	1,64	16,0	1023,2
Posición 0	2,89	4,00	1,84	16,7	1022,0
Posición -1	3,60	4,98	1,58	14,5	1022,4
Posición -2	5,25	5,24	2,52	14,4	1022,3
20 Hz	v_{punta_izq} (m/s)	v_{medio_izq} (m/s)	v_{eye} (m/s)	Temperatura (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	3,06 (2,41)	3,22 (3,09)	1,29 (3,82)	16,2	1023,8
Posición 1	2,89	3,05	1,23	16,3	1022,8
Posición 0	2,52 (3,84)	2,80 (3,62)	1,26 (3,45)	17,0	1021,9
Posición -1	3,00	4,08	1,14	14,6	1021,9
Posición -2	4,52 (4,21)	3,89 (3,81)	1,86 (2,51)	14,5	1022,4
15 Hz	v_{punta_izq} (m/s)	v_{medio_izq} (m/s)	v_{eye} (m/s)	Temperatura (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	1,95	2,83	0,95	16,3	1023,4
Posición 1	2,09	2,30	0,72	16,3	1022,7
Posición 0	2,00	2,22	0,69	17,3	1022,0
Posición -1	2,03	3,04	0,73	14,9	1021,8
Posición -2	2,87	2,87	1,25	14,5	1022,2
13 Hz	v_{punta_izq} (m/s)	v_{medio_izq} (m/s)	v_{eye} (m/s)	Temperatura (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	1,56	2,30	0,68	16,4	1023,6
Posición 1	1,96	1,85	0,60	16,3	1022,5
Posición 0	1,55	1,78	0,53	17,3	1021,9
Posición -1	1,54	2,63	0,74	14,4	1021,7
Posición -2	2,49	2,29	1,10	14,3	1022,2

Tabla 3.2. Resultados perfil izquierdo II (P. Izquierdo Con Rejilla)

• Comparación con medidas de proyecto anterior

Primero, destacar que los datos del trabajo previo fueron obtenidos para un aerogenerador horizontal. Esto supuso posicionar los anemómetros a mayor distancia del panel de rejilla intermedio que lo considerados para el aerogenerador DS – 300. Así, esta diferencia supondrá una variación entre los resultados de ambos proyectos.

Por un lado, hay muy poca variación entre resultados de velocidades en r_{punta} y en r_{medio} de la Posición -2. También, se asemejan los valores de la velocidad de viento en el radio medio de la Posición 2 y la Posición 0. Sin embargo, hay 3 posiciones de medida con ciertas diferencias:

- *Posición 0, r_{punta} .* En el anterior proyecto, este dato era mayor que la velocidad en el radio medio y en la misma posición vertical. A esta altura, se aproxima el centro geométrico de los cuatro ventiladores, el cual se encuentra más cercano al radio medio. Así, lo esperado es que la velocidad en el radio medio sea mayor que en el radio de punta.
- *Posición 2, r_{punta} .* En los resultados anteriores hay una notable diferencia entre esta medida y el valor de v_{medio} . Esta diferencia es máxima para 50 Hz, resultando ser de aproximadamente 4 m/s. Mientras que en el presente ensayo, la diferencia máxima es de aproximadamente 2 m/s. Esta diferencia podría ser debida a una mala posición de este anemómetro en el trabajo anterior.
- *Posiciones verticales, r_{eje} .* Hay una disminución muy notable con respecto al anterior trabajo en esta serie de medidas. Esta posición horizontal es crítica, ya que un pequeño desplazamiento horizontal del anemómetro supone una alta variación en su medida. Esto es debido a su posición, la cual se corresponde a la intersección vertical de los cuatro ventiladores, en donde se genera un vacío de viento.

3.4.2. Comparativa de perfiles de viento con y sin rejilla intermedia

Una vez completados y justificados los valores obtenidos del perfil izquierdo de velocidades para el caso con rejilla intermedia, se pueden comparar estos valores con los obtenidos al quitar rejilla. Estos últimos resultados se muestran tabla 3.3 y tabla 3.4).

A continuación, para cuantificar el **grado de homogeneidad de velocidad de viento** en ambos casos, se va a emplear un parámetro estadístico tan importante como es la *desviación típica o estándar*, σ :

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad n = n^o \text{ de muestras; } x_i = \text{valor de la muestra en cuestión}$$

\bar{x} = media aritmética: $\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$. Así los resultados obtenidos de desviación típica en ambos escenarios son mostrados en las tablas 3.5 y 3.6.

Velocidad, temperatura y presión. Perfil izquierdo sin rejilla intermedia					
50 Hz	v_{punta_izq} (m/s)	v_{medio_izq} (m/s)	v_{eje} (m/s)	Temperatura (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	4,85	11,02	8,44	21,5	1016,6
Posición 1	9,79	7,11	9,92	22,0	1016,6
Posición 0	7,00	7,48	7,33	21,9	1013,8
Posición -1	5,94	10,14	6,46	22,2	1013,6
Posición -2	9,10	9,32	11,88	22,4	1013,4
45 Hz	v_{punta_izq} (m/s)	v_{medio_izq} (m/s)	v_{eje} (m/s)	Temperatura (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	4,40	10,21	7,66	21,4	1020,4
Posición 1	8,87	6,42	8,49	21,9	1020,1
Posición 0	6,31	6,48	5,90	21,7	1015,3
Posición -1	5,61	8,93	6,31	22,0	1015,1
Posición -2	7,50	9,03	10,66	22,2	1014,9
40 Hz	v_{punta_izq} (m/s)	v_{medio_izq} (m/s)	v_{eje} (m/s)	Temperatura (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	3,70	8,94	6,78	21,3	1020,4
Posición 1	7,48	5,87	7,60	21,8	1020,4
Posición 0	5,73	6,15	6,05	21,4	1015,3
Posición -1	4,76	8,31	5,56	21,9	1015,2
Posición -2	7,14	8,19	9,86	22,0	1014,9
35 Hz	v_{punta_izq} (m/s)	v_{medio_izq} (m/s)	v_{eje} (m/s)	Temperatura (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	3,36	7,99	5,83	21,2	1020,5
Posición 1	7,20	5,14	6,90	21,8	1020,2
Posición 0	5,11	4,81	5,04	21,3	1015,0
Posición -1	4,96	7,63	4,71	21,8	1015,0
Posición -2	6,30	7,16	8,06	21,8	1014,9
30 Hz	v_{punta_izq} (m/s)	v_{medio_izq} (m/s)	v_{eje} (m/s)	Temperatura (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	2,55	7,10	5,45	21,2	1019,8
Posición 1	6,17	4,33	5,48	21,8	1016,4
Posición 0	4,00	4,08	4,26	21,2	1014,9
Posición -1	4,05	6,51	4,09	21,6	1014,7
Posición -2	5,56	6,02	7,26	21,8	1014,8
25 Hz	v_{punta_izq} (m/s)	v_{medio_izq} (m/s)	v_{eje} (m/s)	Temperatura (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	1,92	5,64	4,47	21,2	1019,6
Posición 1	5,00	3,38	4,59	22,0	1014,4
Posición 0	3,63	2,95	3,47	21,3	1014,7
Posición -1	3,23	5,27	3,30	21,6	1014,8
Posición -2	4,53	4,96	5,66	21,8	1014,8

Tabla 3.3. Resultados de perfil izquierdo de viento sin rejilla intermedia I

Velocidad, temperatura y presión. Perfil izquierdo sin rejilla intermedia					
20 Hz	v_{punta_izq} (m/s)	v_{medio_izq} (m/s)	v_{eje} (m/s)	Temperatura (°C)	$P_{barométrica}$ (mbar)
Posición 2	1,69	4,45	3,38	21,3	1019,0
Posición 1	4,07	2,78	3,53	22,1	1014,2
Posición 0	2,69	2,84	2,67	21,2	1014,7
Posición -1	2,48	4,22	2,51	21,7	1014,5
Posición -2	3,42	3,73	4,38	22,0	1014,6
15 Hz	v_{punta_izq} (m/s)	v_{medio_izq} (m/s)	v_{eje} (m/s)	Temperatura (°C)	$P_{barométrica}$ (mbar)
Posición 2	1,45	3,25	2,09	21,3	1019,0
Posición 1	3,06	2,06	2,53	22,2	1014,1
Posición 0	2,00	1,72	2,03	21,3	1014,8
Posición -1	1,88	3,04	1,74	21,8	1014,5
Posición -2	2,40	2,71	3,33	22,1	1014,4
13 Hz	v_{punta_izq} (m/s)	v_{medio_izq} (m/s)	v_{eje} (m/s)	Temperatura (°C)	$P_{barométrica}$ (mbar)
Posición 2	1,12	2,89	1,95	21,5	1018,9
Posición 1	2,55	2,17	2,38	22,2	1014,2
Posición 0	1,57	2,00	1,37	21,4	1014,7
Posición -1	1,64	2,75	1,48	21,8	1014,5
Posición -2	2,04	2,45	2,99	22,0	1014,5

Tabla 3.4. Resultados de perfil izquierdo de viento sin rejilla intermedia II

Nótese que un parámetro que aparece en la definición de desviación típica es el número de muestras. Por lo tanto, hay que comparar ambos perfiles de velocidad de viento con el mismo número de muestras, tal y como se está llevando a cabo.

Así los resultados obtenidos de desviación típica en ambos escenarios son:

Homogeneidad del viento. Cálculo de σ				
Perfil izquierdo con rejilla intermedia				
$f_{ventiladores}$ (Hz)	r_{punta_izq}	r_{medio_izq}	r_{eje}	$\bar{\sigma}_{perfil\ izq}$
13	0,41	0,35	0,22	0,33
15	0,38	0,37	0,24	0,33
20	0,77	0,55	0,29	0,54
25	0,88	0,73	0,38	0,66
30	1,04	0,75	0,53	0,77
35	0,97	0,47	0,55	0,66
40	1,11	0,81	1,11	1,01
45	1,24	0,72	1,26	1,08
50	1,51	0,74	1,38	1,21

Tabla 3.5. Homogeneidad de viento con y sin rejilla intermedia en perfil izquierdo I

Homogeneidad del viento. Cálculo de σ					
Perfil izquierdo sin rejilla intermedia					
f_{ventiladores} (Hz)	r_{punta_izq}	r_{medio_izq}	r_{eje}	$\bar{\sigma}_{\text{perfil izq}}$	
13	0,54	0,38	0,67	0,53	
15	0,61	0,65	0,62	0,63	
20	0,91	0,77	0,75	0,81	
25	1,20	1,20	0,96	1,12	
30	1,43	1,34	1,27	1,35	
35	1,46	1,47	1,38	1,43	
40	1,59	1,39	1,70	1,56	
45	1,72	1,69	1,90	1,77	$\bar{\sigma}_{\text{perfil izq}}$
50	2,08	1,69	2,15	1,97	1,24

Tabla 3.6. Homogeneidad de viento con y sin rejilla intermedia en perfil izquierdo II

Véase que la **desviación típica media total** en el escenario **con rejilla intermedia** es de **0,73**, mientras que ese mismo parámetro en los ensayos **sin rejilla intermedia** es de **1,24**.

Como en los **ensayos sin rejilla intermedia**, se ha obtenido un **bajo grado de homogeneidad del viento** en su perfil izquierdo (alta desviación típica media total), no se creará un campo de velocidades suficientemente homogéneo para poder comparar con datos de potencia eléctrica – velocidad de viento del fabricante. Por lo tanto, **no se va a obtener su perfil completo de velocidades**.

• Velocidades medias en el plano vertical

Una incógnita destacable en el mapeo de velocidades de viento, es saber en cuál de las posiciones del plano vertical, la velocidad de viento es más próxima a un valor promedio. Para ello se definen las siguientes tablas y gráficas:

Velocidades medias en plano vertical. Perfil izquierdo con rejilla intermedia									
	13 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz
Posición 2	1,51	1,91	2,52	3,35	4,19	4,97	5,89	6,80	7,66
Posición 1	1,47	1,70	2,39	2,97	3,98	4,93	5,73	6,74	7,14
Posición 0	1,29	1,63	2,19	2,91	3,91	4,97	5,59	6,50	7,29
Posición -1	1,64	1,93	2,74	3,39	4,23	5,14	5,65	6,42	7,04
Posición -2	1,96	2,33	3,42	4,33	5,33	6,22	7,43	8,59	9,36
Promedio	1,57	1,90	2,65	3,39	4,33	5,25	6,06	7,01	7,70

Tabla 3.7. Velocidades medias en plano vertical. Perfil izquierdo con rejilla intermedia

	Velocidades medias en plano vertical. Perfil izquierdo sin rejilla intermedia								
	13 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz
Posición 2	1,99	2,26	3,18	4,01	5,04	5,73	6,47	7,42	8,10
Posición 1	2,37	2,55	3,46	4,33	5,33	6,41	6,98	7,93	8,94
Posición 0	1,65	1,92	2,74	3,35	4,11	4,99	5,98	6,23	7,27
Posición -1	1,96	2,22	3,07	3,94	4,88	5,77	6,21	6,95	7,51
Posición -2	2,49	2,81	3,84	5,05	6,28	7,17	8,41	9,06	10,10
Promedio	2,09	2,35	3,26	4,13	5,13	6,01	6,81	7,52	8,38

Tabla 3.8. Velocidades medias en plano vertical. Perfil izquierdo sin rejilla intermedia

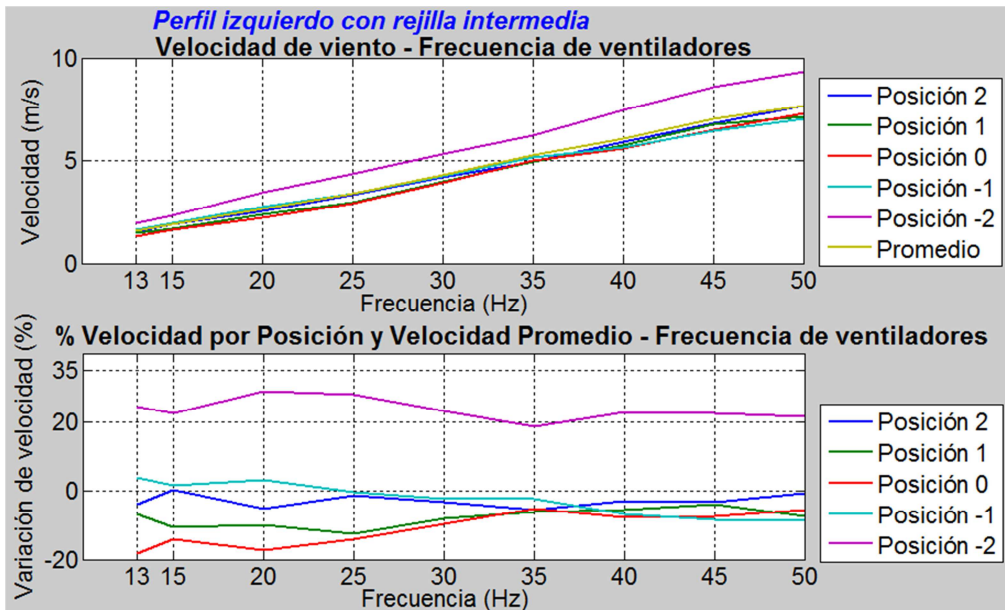


Figura 3.8. Velocidades medias en plano vertical. Perfil izquierdo con rejilla intermedia

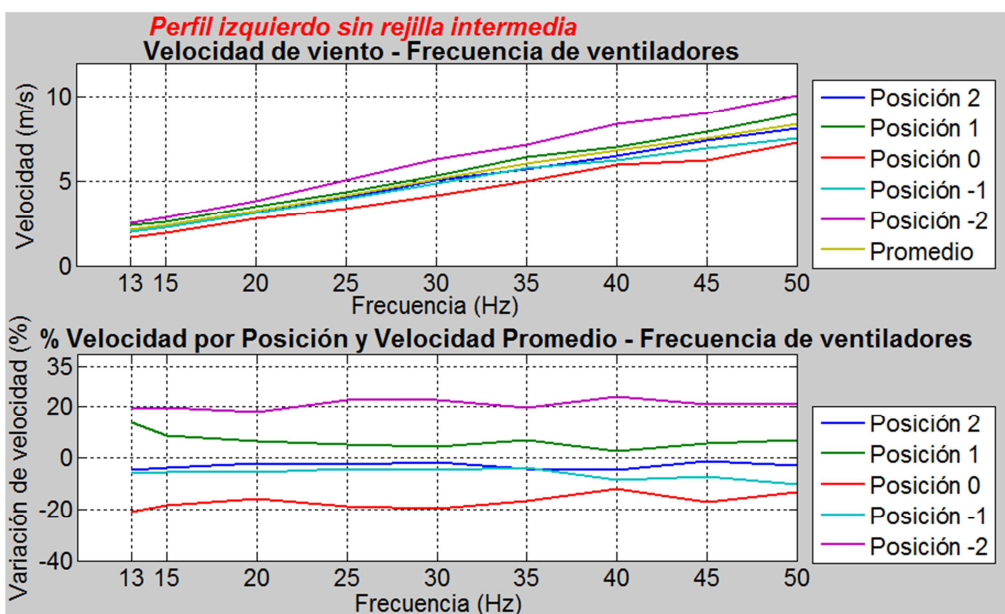


Figura 3.9. Velocidades medias en plano vertical. Perfil izquierdo sin rejilla intermedia

- En el **perfil izquierdo con rejilla intermedia** no hay un orden fijo de valores de velocidad de viento por posiciones verticales. Hay una secuencia hasta una frecuencia de ventiladores de 35 Hz, y para frecuencias mayores se da otro orden de valores de velocidad de viento. En este caso, la **velocidad media en la Posición 2** sería la más cercana al valor promedio.

- En el **perfil derecho sin rejilla intermedia** sí existe una secuencia que se repite en todos los ensayos: $v_{\text{Posición -2}} > v_{\text{Posición 1}} > v_{\text{Posición 2}} > v_{\text{Posición -1}} > v_{\text{Posición 0}}$

En este escenario, la **velocidad media en la Posición 1** es la más próxima a la **velocidad promedio**.

- En **ambos** casos, las **medidas de velocidad que más se alejan de la media** son las tomadas en la **Posición -2**.

Otra forma de visualizar la velocidad de viento en el plano vertical es mediante gráficos de barras horizontales:

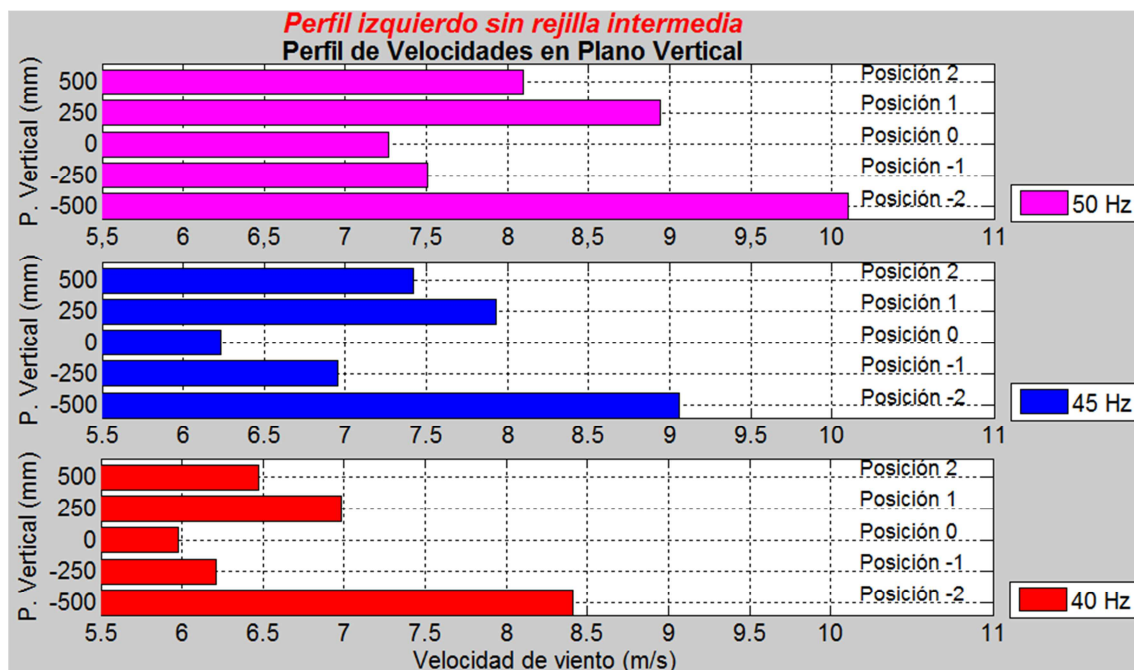


Figura 3.10. Velocidades medias en plano vertical II. Perfil izquierdo sin rejilla intermedia

• Velocidades medias en el plano horizontal

Se puede realizar un análisis de velocidades medias con respecto a los puntos de radio de punta, medio y eje del perfil izquierdo. A continuación se exponen las tablas y gráficas correspondientes de ambos escenarios:

	Velocidades medias en plano horizontal. Perfil izquierdo con rejilla intermedia								
Frecuencia (Hz)	13	15	20	25	30	35	40	45	50
v_{punta_izq} (m/s)	1,82	2,19	3,20	3,96	4,90	5,85	6,50	7,45	7,77
v_{medio_izq} (m/s)	2,17	2,65	3,41	4,35	5,45	6,27	7,12	7,90	8,80
v_{eje} (m/s)	0,73	0,87	1,36	1,85	2,64	3,62	4,56	5,68	6,52

Tabla 3.10. Velocidades medias en plano vertical. Perfil izquierdo con rejilla intermedia

	Velocidades medias en plano horizontal. Perfil izquierdo sin rejilla intermedia								
Frecuencia (Hz)	13	15	20	25	30	35	40	45	50
v_{punta_izq} (m/s)	1,79	2,16	2,87	3,66	4,47	5,39	5,76	6,54	7,34
v_{medio_izq} (m/s)	2,45	2,56	3,61	4,44	5,61	6,55	7,49	8,21	9,01
v_{eje} (m/s)	2,03	2,34	3,29	4,30	5,31	6,11	7,18	7,80	8,80

Tabla 3.11. Velocidades medias en plano vertical. Perfil izquierdo sin rejilla intermedia

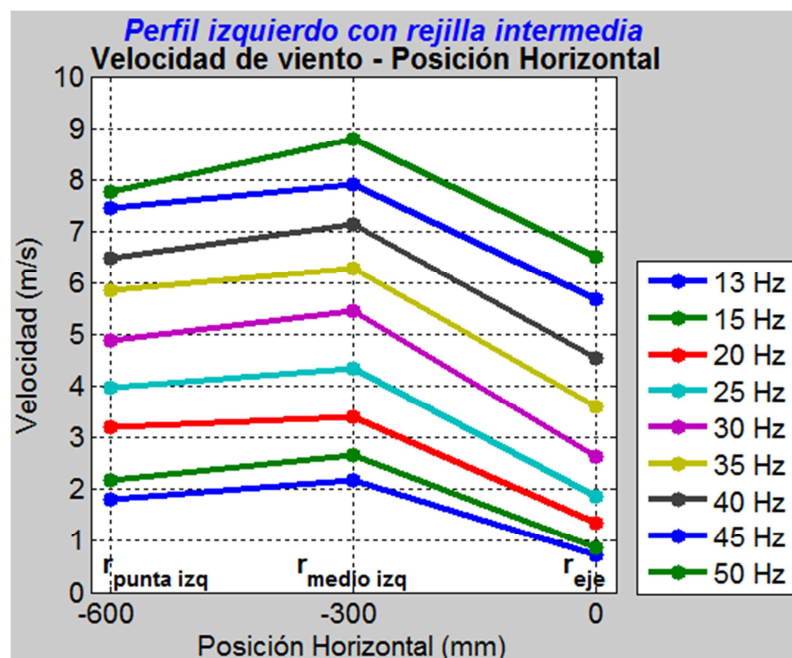


Figura 3.11. Velocidades medias en plano vertical. Perfil izquierdo con rejilla intermedia

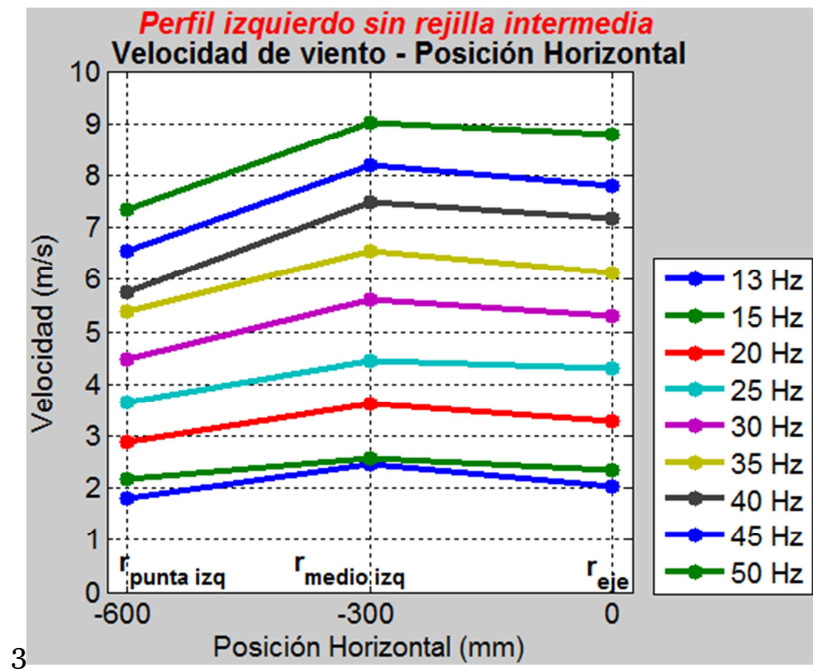


Figura 3.12. Velocidades medias en plano vertical. Perfil izquierdo sin rejilla intermedia

- En **ambos** casos, la **velocidad máxima** aparece en el **radio medio**. Es consecuencia de la posición de este punto de medida con respecto al centro geométrico de los ventiladores.
- En el **perfil izquierdo con rejilla intermedia**, la **velocidad en el radio del eje** del aerogenerador es la **menor** en el plano horizontal.
- En el **perfil izquierdo sin rejilla intermedia**, la **velocidad en el radio de punta del álabe** es la **menor** en el plano horizontal. Al no haber un panel de rejilla, el flujo de viento tiende a desplazarse hacia el eje del aerogenerador.

• Velocidad promedio del perfil de viento

Si se quiere obtener una visión global del perfil de velocidades de viento, se realiza un valor promedio total. Es decir, hacer una media aritmética de los valores en el plano vertical, y otra media en el plano horizontal, todas ellas para una frecuencia de ventiladores determinada. De esta manera se obtienen las siguientes velocidades de viento promedio:

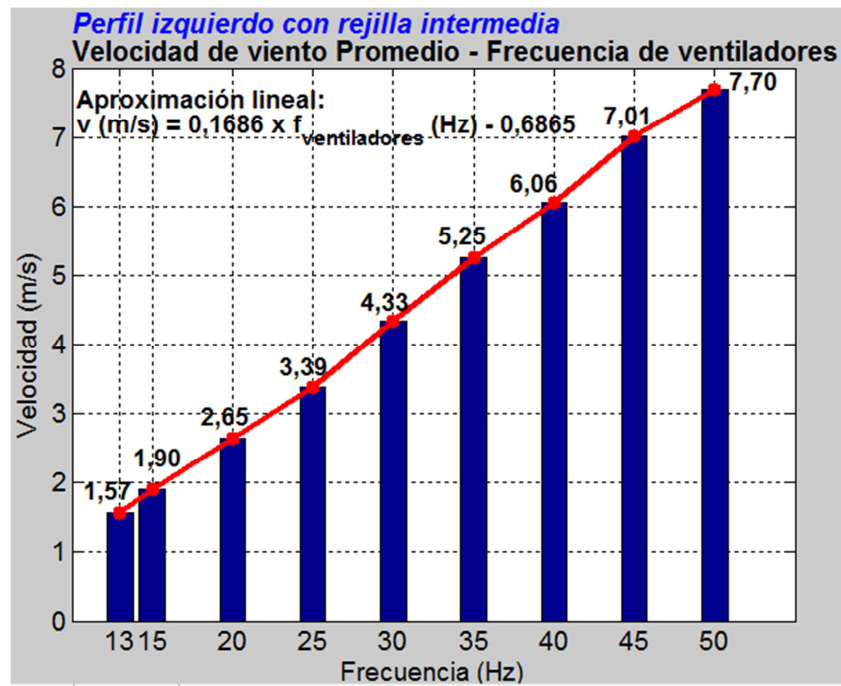


Figura 3.13. Velocidad de viento promedio – Frecuencia de ventiladores. P. Izq. con rejilla

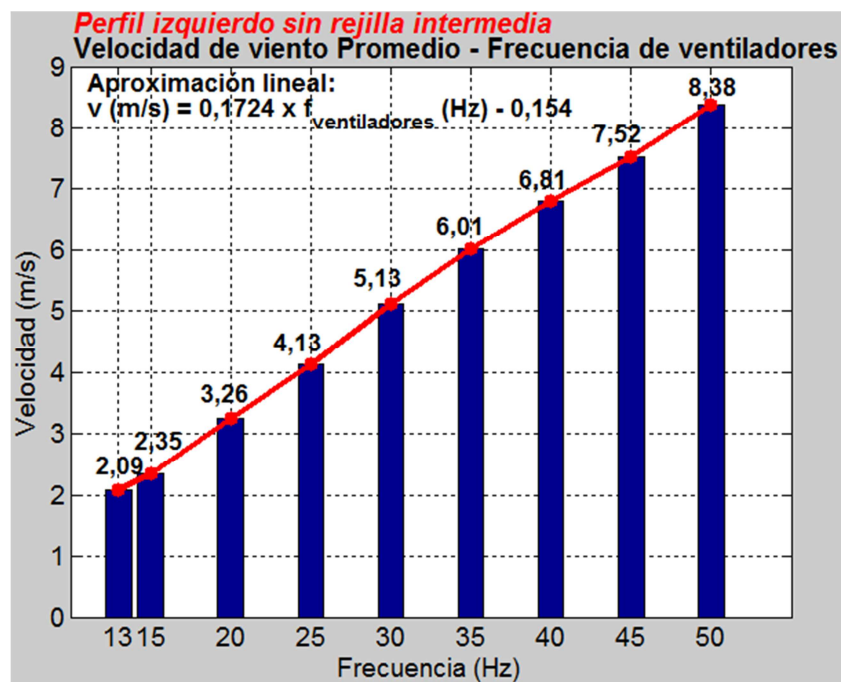


Figura 3.14. Velocidad de viento promedio – Frecuencia de ventiladores. P. Izq. sin rejilla

Además, se pueden comparar ambas velocidades de viento promedio en situación con y sin rejilla intermedia. Evidentemente, la velocidad de viento promedio sin rejilla intermedia es siempre mayor que con rejilla intermedia. Sin embargo, esta variación no es constante, mostrándose dicha variabilidad en la siguiente gráfica:

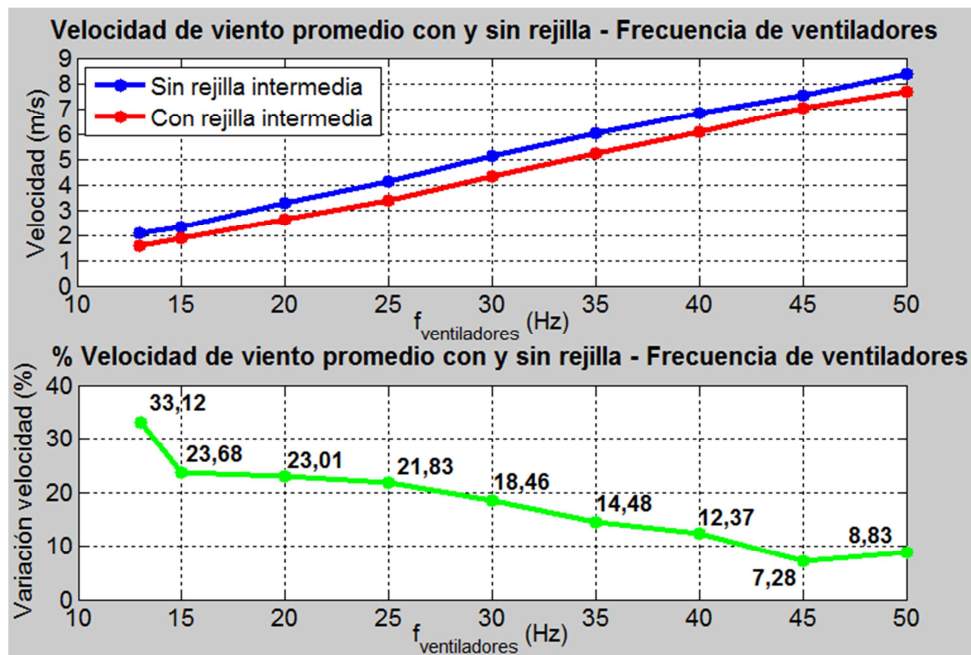


Figura 3.15. Velocidad de viento promedio–Frecuencia ventiladores, con y sin rejilla intermedia

El **aumento** de la **mayor velocidad de viento posible** es de un **8,83 %** cuando se **quita la rejilla intermedia**. Como era de esperar, no supone un aumento de velocidad elevado.

A baja frecuencia de ventiladores (20, 25, 30 y 35 Hz), la velocidad de viento aumenta en torno a un 20 – 30 %. Este aumento no se es importante porque a esas frecuencias de ventiladores se genera muy poca potencia eléctrica, como máximo 15 W. Para más detalles sobre la comparativa entre potencia eléctrica generada con y sin rejilla intermedia véase el Capítulo 4.

3.4.3. Perfil de viento completo con rejilla intermedia

Una vez obtenido el perfil de izquierdo de viento, para obtener el perfil completo, sólo faltan los valores de velocidad de viento en radio medio derecho y en radio de punta derecho.

Los ensayos de cada uno de los perfiles se han hecho en distintos días, lo que se traduce en distintas condiciones ambientales: temperatura y presión. Sin embargo, la variación de estos valores no es significativa en el valor de velocidad de viento. Por lo tanto sí se puede aunar los resultados de los perfiles izquierdo y derecho obtenidos a T^a y $P_{absoluta}$ distintos. Los resultados del perfil completo se muestran en las siguientes tablas.

Así, se ha determinado escoger los valores de temperatura y presión barométrica relativos al perfil izquierdo. Se ha hecho así, porque la relación $(P_{barométrica}/T)$ es ligeramente superior y más uniforme, que el relativo al perfil derecho. Así, se obtendrá en el análisis eléctrico – mecánico la potencia eólica máxima y más uniforme posible.

Velocidad, temperatura y presión. Perfil de viento completo con rejilla intermedia							
50 Hz	Vpunta_izq (m/s)	Vmedio_izq (m/s)	Veje (m/s)	Vmedio_der (m/s)	Vpunta_der (m/s)	T^a (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	6,95	9,22	6,82	5,58	2,79	15,6	1020,2
Posición 1	7,20	7,85	6,38	5,24	6,08	15,7	1019,8
Posición 0	6,81	8,16	6,91	9,32	5,59	15,9	1019,1
Posición -1	7,47	9,31	4,35	9,50	3,71	14,2	1019,2
Posición -2	10,44	9,47	8,16	7,25	6,12	13,9	1019,6
45 Hz	Vpunta_izq (m/s)	Vmedio_izq (m/s)	Veje (m/s)	Vmedio_der (m/s)	Vpunta_der (m/s)	T^a (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	7,13	7,63	5,64	4,35	2,74	15,8	1024,0
Posición 1	7,12	7,39	5,72	4,62	5,71	15,7	1023,4
Posición 0	6,30	7,19	6,01	7,47	4,40	16,0	1022,8
Posición -1	7,10	8,39	3,77	8,03	3,53	14,2	1022,9
Posición -2	9,58	8,90	7,29	5,74	5,44	13,9	1023,4
40 Hz	Vpunta_izq (m/s)	Vmedio_izq (m/s)	Veje (m/s)	Vmedio_der (m/s)	Vpunta_der (m/s)	T^a (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	6,20	7,02	4,45	3,42	2,23	15,8	1024,3
Posición 1	6,19	6,66	4,35	3,63	4,16	15,8	1023,5
Posición 0	5,87	6,10	4,80	6,44	3,71	16,2	1022,6
Posición -1	5,75	8,14	3,05	7,05	3,17	14,3	1022,8
Posición -2	8,47	7,70	6,15	4,55	4,31	14,0	1023,3
35 Hz	Vpunta_izq (m/s)	Vmedio_izq (m/s)	Veje (m/s)	Vmedio_der (m/s)	Vpunta_der (m/s)	T^a (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	5,36	6,14	3,41	3,20	1,70	15,9	1023,0
Posición 1	5,79	5,76	3,24	2,97	3,34	15,9	1023,6
Posición 0	5,07	5,95	3,90	5,26	2,97	16,4	1022,3
Posición -1	5,50	6,82	3,09	5,75	2,35	14,3	1022,5
Posición -2	7,53	6,70	4,44	3,50	3,63	14,0	1022,9
30 Hz	Vpunta_izq (m/s)	Vmedio_izq (m/s)	Veje (m/s)	Vmedio_der (m/s)	Vpunta_der (m/s)	T^a (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	5,11	5,12	2,34	2,00	1,34	15,9	1020,1
Posición 1	4,94	4,77	2,24	2,36	2,80	16,1	1023,2
Posición 0	3,83	4,84	3,06	3,89	2,24	16,6	1022,2
Posición -1	4,11	6,36	2,22	4,44	1,95	14,4	1022,5
Posición -2	6,50	6,14	3,36	2,57	2,56	14,2	1023,0
25 Hz	Vpunta_izq (m/s)	Vmedio_izq (m/s)	Veje (m/s)	Vmedio_der (m/s)	Vpunta_der (m/s)	T^a (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	4,32	4,04	1,69	1,62	1,01	16,1	1023,9
Posición 1	3,76	3,51	1,64	1,60	1,96	16,0	1023,2
Posición 0	2,89	4,00	1,84	2,63	1,88	16,7	1022,0
Posición -1	3,60	4,98	1,58	3,02	1,55	14,5	1022,4
Posición -2	5,25	5,24	2,52	2,02	1,93	14,4	1022,3

Tabla 3.12. Resultados de perfil de viento completo con rejilla intermedia I

Velocidad, temperatura y presión. Perfil de viento completo con rejilla intermedia							
20 Hz	V_{punta_izq} (m/s)	V_{medio_izq} (m/s)	Veje (m/s)	V_{medio_der} (m/s)	V_{punta_der} (m/s)	T^a (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	4,32	4,04	1,69	1,62	1,01	16,2	1023,8
Posición 1	3,76	3,51	1,64	1,60	1,96	16,3	1022,8
Posición 0	2,89	4,00	1,84	2,63	1,88	17,0	1021,9
Posición -1	3,60	4,98	1,58	3,02	1,55	14,6	1021,9
Posición -2	5,25	5,24	2,52	2,02	1,93	14,5	1022,4
15 Hz	V_{punta_izq} (m/s)	V_{medio_izq} (m/s)	Veje (m/s)	V_{medio_der} (m/s)	V_{punta_der} (m/s)	T^a (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	3,06	3,22	1,29	1,31	0,78	16,3	1023,4
Posición 1	2,89	3,05	1,23	1,47	1,55	16,3	1022,7
Posición 0	2,52	2,80	1,26	1,92	1,16	17,3	1022,0
Posición -1	3,00	4,08	1,14	2,25	1,38	14,9	1021,8
Posición -2	4,52	3,89	1,86	1,22	1,38	14,5	1022,2
13 Hz	V_{punta_izq} (m/s)	V_{medio_izq} (m/s)	Veje (m/s)	V_{medio_der} (m/s)	V_{punta_der} (m/s)	T^a (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	1,95	2,83	0,95	1,19	0,47	16,4	1023,6
Posición 1	2,09	2,30	0,72	1,12	1,03	16,3	1022,5
Posición 0	2,00	2,22	0,69	1,52	0,77	17,3	1021,9
Posición -1	2,03	3,04	0,73	1,53	0,87	14,4	1021,7
Posición -2	2,87	2,87	1,25	0,95	0,90	14,3	1022,2

Tabla 3.13. Resultados de perfil de viento completo con rejilla intermedia II

- Nótese, que si se comparan las **velocidades en radio de punta y en radio medio** de ambos perfiles (izquierdo y derecho), se tiene que la velocidad en el perfil derecho es menor que en el perfil izquierdo: $v_{\text{Perfil_Izquierdo}} > v_{\text{Perfil_Derecho}}$

Esto puede ser debido a la presencia de cámaras intercambiadoras de calor de grandes dimensiones que hay a poca distancia del perfil derecho de la instalación eólica. Estos últimos equipos son ajenos a la presente instalación.

- Para apreciar mejor el **bajo grado de homogeneización de flujo de aire** en el caso con rejilla intermedia, se pueden realizar **mapas de velocidades**. En las dos figuras siguientes, se exponen los mapas de velocidades correspondientes a las tres mayores velocidades de viento posible.

- En esas figuras, se observa que para el caso de máxima velocidad de viento, que hay picos de velocidades en torno a 10 m/s, y mínimos sobre 3 m/s. Estos puntos en los que se crea un **notable vacío de viento**, son comunes en todos los ensayos de este caso, y son los siguientes:

- **Posición -1; radio eje y radio de punta derecho.**
- **Posición 2; radio punta derecho.**

- Mientras que las **velocidades máximas** aparecen en los puntos:
 - **Posición -2; radio medio y punta izquierdo.**
 - **Posición 2; radio eje izquierdo.**
 - **Posición 0 y -1; radio medio derecho.**

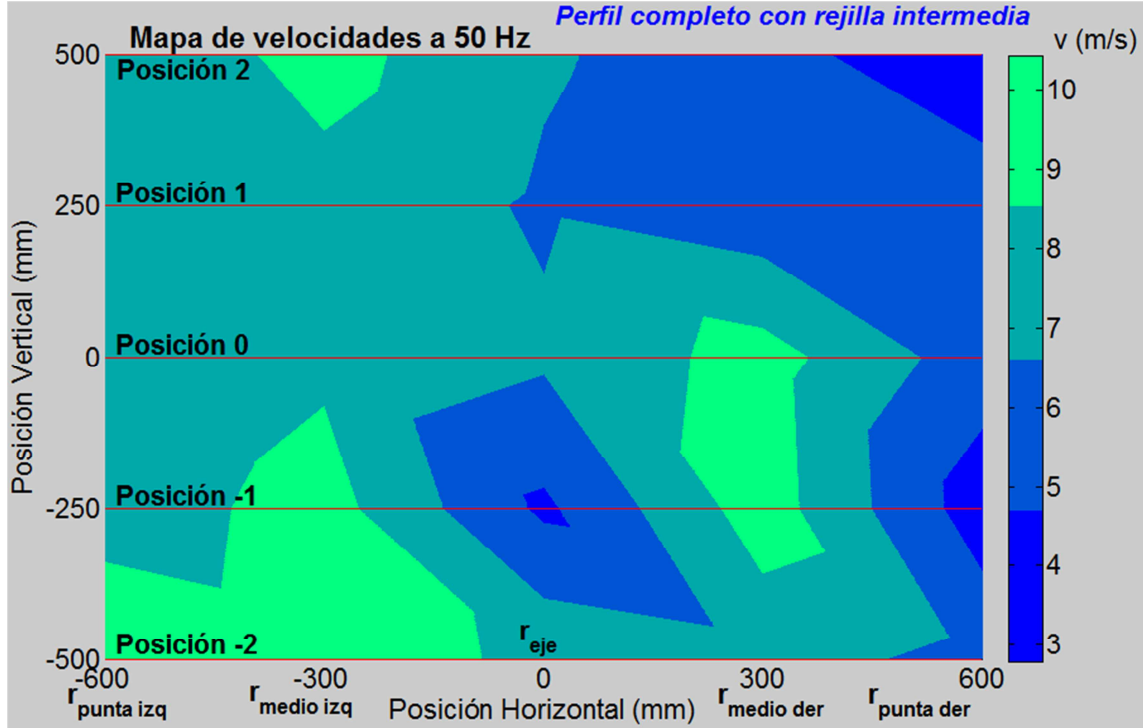


Figura 3.16. Mapa de velocidades de perfil completo con rejilla intermedia I

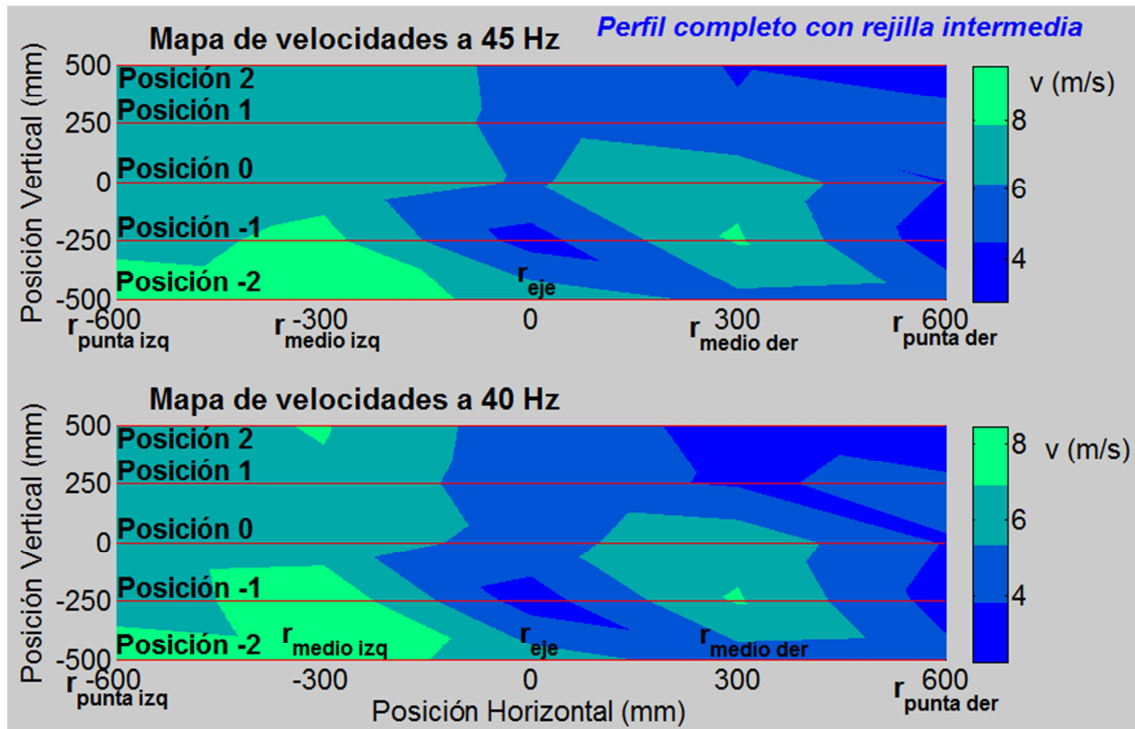


Figura 3.17. Mapa de velocidades de perfil completo con rejilla intermedia II

3.4.4. Perfil de viento completo con tobera reductora

En el caso de tobera reductora, se expone en la siguiente tabla los resultados del perfil de viento completo. Al aunar ambos perfiles de viento, izquierdo y derecho, se ha determinado escoger los valores de temperatura y presión barométrica relativos al perfil izquierdo. Su justificación es análoga al caso con rejilla intermedia.

Velocidad, temperatura y presión. Perfil de viento completo con tobera reductora							
50 Hz	V_{punta_izq} (m/s)	V_{medio_izq} (m/s)	V_{eye} (m/s)	V_{medio_der} (m/s)	V_{punta_der} (m/s)	T^a (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	12,73	11,92	12,28	13,15	14,01	25,6	1018,9
Posición 1	10,48	10,71	13,29	9,71	12,50	25,5	1020,8
Posición 0	10,75	10,33	8,39	11,07	11,80	21,6	1020,9
Posición -1	11,83	10,23	9,19	8,34	11,13	25,5	1018,8
Posición -2	12,12	9,63	12,43	10,73	10,66	26,1	1018,6
45 Hz	V_{punta_izq} (m/s)	V_{medio_izq} (m/s)	V_{eye} (m/s)	V_{medio_der} (m/s)	V_{punta_der} (m/s)	T^a (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	11,42	11,01	11,07	11,44	12,51	25,3	1019,7
Posición 1	9,03	9,89	11,51	8,44	10,88	26,0	1021,6
Posición 0	9,72	9,62	7,56	10,78	9,29	24,2	1021,7
Posición -1	10,74	9,36	8,17	7,39	10,04	25,2	1019,7
Posición -2	10,80	8,90	11,17	9,94	9,30	25,8	1019,4
40 Hz	V_{punta_izq} (m/s)	V_{medio_izq} (m/s)	V_{eye} (m/s)	V_{medio_der} (m/s)	V_{punta_der} (m/s)	T^a (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	9,96	10,08	9,76	9,53	10,58	24,5	1019,7
Posición 1	7,58	8,48	9,78	7,85	9,98	28,0	1021,6
Posición 0	8,56	8,88	6,75	9,27	7,43	24,3	1021,8
Posición -1	9,25	8,66	7,82	6,63	8,11	24,2	1019,7
Posición -2	8,83	7,73	10,08	8,20	8,56	24,9	1019,4
35 Hz	V_{punta_izq} (m/s)	V_{medio_izq} (m/s)	V_{eye} (m/s)	V_{medio_der} (m/s)	V_{punta_der} (m/s)	T^a (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	8,73	8,63	8,45	9,07	9,48	26,5	1019,7
Posición 1	6,71	7,59	8,37	6,73	8,85	27,4	1021,5
Posición 0	7,36	7,79	5,31	6,39	6,46	24,4	1021,7
Posición -1	8,25	7,83	6,95	5,27	7,35	25,4	1019,5
Posición -2	8,46	6,59	8,78	6,93	6,92	25,8	1019,1
30 Hz	V_{punta_izq} (m/s)	V_{medio_izq} (m/s)	V_{eye} (m/s)	V_{medio_der} (m/s)	V_{punta_der} (m/s)	T^a (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	7,60	7,60	7,32	7,42	7,66	26,2	1019,8
Posición 1	5,92	6,40	7,25	5,80	7,54	27,1	1021,6
Posición 0	6,53	6,66	4,33	5,38	4,65	24,3	1021,8
Posición -1	7,23	6,66	6,06	4,18	5,92	25,2	1019,4
Posición -2	7,35	5,83	7,40	5,75	4,98	25,5	1019,2

Tabla 3.14. Resultados de perfil de viento completo con tobera reductora I

Velocidad, temperatura y presión. Perfil de viento completo con tobera reductora							
25 Hz	V_{punta_izq} (m/s)	V_{medio_izq} (m/s)	Veje (m/s)	V_{medio_der} (m/s)	V_{punta_der} (m/s)	T^a (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	6,26	6,32	6,06	6,07	6,24	25,7	1019,7
Posición 1	5,26	5,45	6,14	4,52	6,09	26,5	1021,5
Posición 0	5,17	5,44	3,86	3,91	3,41	23,9	1021,8
Posición -1	6,25	5,52	5,13	2,95	5,02	25,2	1019,4
Posición -2	6,18	5	6,41	4,05	4,10	25,8	1019,2
20 Hz	V_{punta_izq} (m/s)	V_{medio_izq} (m/s)	Veje (m/s)	V_{medio_der} (m/s)	V_{punta_der} (m/s)	T^a (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	5,27	5,17	4,89	4,74	4,73	25,8	1019,6
Posición 1	4,21	4,45	4,93	3,57	4,41	26,4	1021,5
Posición 0	4,32	4,41	2,87	2,82	2,26	23,7	1021,7
Posición -1	4,75	4,35	4,16	2,26	3,21	24,7	1019,2
Posición -2	4,83	3,59	5,13	2,74	3,23	26,0	1019,2
15 Hz	V_{punta_izq} (m/s)	V_{medio_izq} (m/s)	Veje (m/s)	V_{medio_der} (m/s)	V_{punta_der} (m/s)	T^a (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	3,93	3,74	3,70	3,16	3,17	25,8	1019,6
Posición 1	3,46	3,38	3,86	2,61	3,15	25,7	1021,5
Posición 0	3,41	3,10	2,31	1,63	1,34	22,9	1021,7
Posición -1	3,50	3,08	2,92	1,56	2,24	24,5	1019,3
Posición -2	3,44	2,61	3,57	2,34	2,42	26,0	1019,2
13 Hz	V_{punta_izq} (m/s)	V_{medio_izq} (m/s)	Veje (m/s)	V_{medio_der} (m/s)	V_{punta_der} (m/s)	T^a (°C)	P_{barométrica} (mbar)
Posición 2	3,49	3,33	3,18	3,02	2,80	25,1	1019,6
Posición 1	2,76	2,79	3,35	2,20	2,93	25,4	1021,6
Posición 0	3,05	2,76	2,27	1,37	1,06	22,2	1021,7
Posición -1	3,06	2,81	2,55	1,70	2,06	24,4	1019,3
Posición -2	2,91	2,16	2,85	2,31	2,13	25,8	1019,2

Tabla 3.15. Resultados de perfil de viento completo con tobera reductora II

Si comparamos los datos de las anteriores tablas, con los resultados de los anteriores perfiles de viento, mostrados en las tablas 3.3, 3.4, 3.12 y 3.13, se ve claramente que la **distribución de velocidad de viento es más heterogénea en el caso de sin rejilla intermedia**. Para justificar este hecho, véase el apartado 3.4.5.

De forma análoga al perfil completo de viento con rejilla intermedia, se representan en las dos siguientes figuras los mapas de velocidades de los tres ensayos a frecuencia de ventiladores de 50, 45 y 40 Hz. Deteniéndose en dichas gráficas se concluye que:

- Las **velocidades máximas** aparecen en:
 - **Posición 2; radio de punta derecho y radio eje.**
 - **Posición 1; radio eje.**
- La **menor velocidad de viento** se encuentra en la zona central derecha del mapa de velocidades:
 - **Posiciones verticales: 1, 0 y -1.**
 - **Posiciones horizontales: radio eje y medio derecho.**

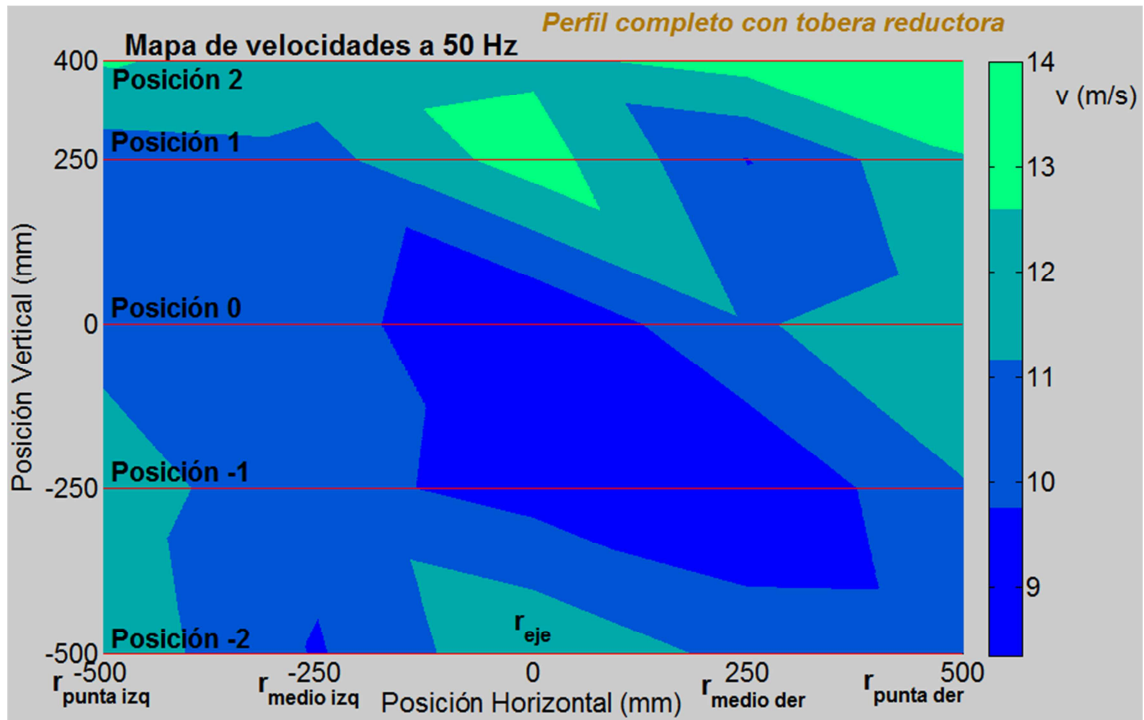


Figura 3.18. Mapa de velocidades de perfil completo con tobera reductora I

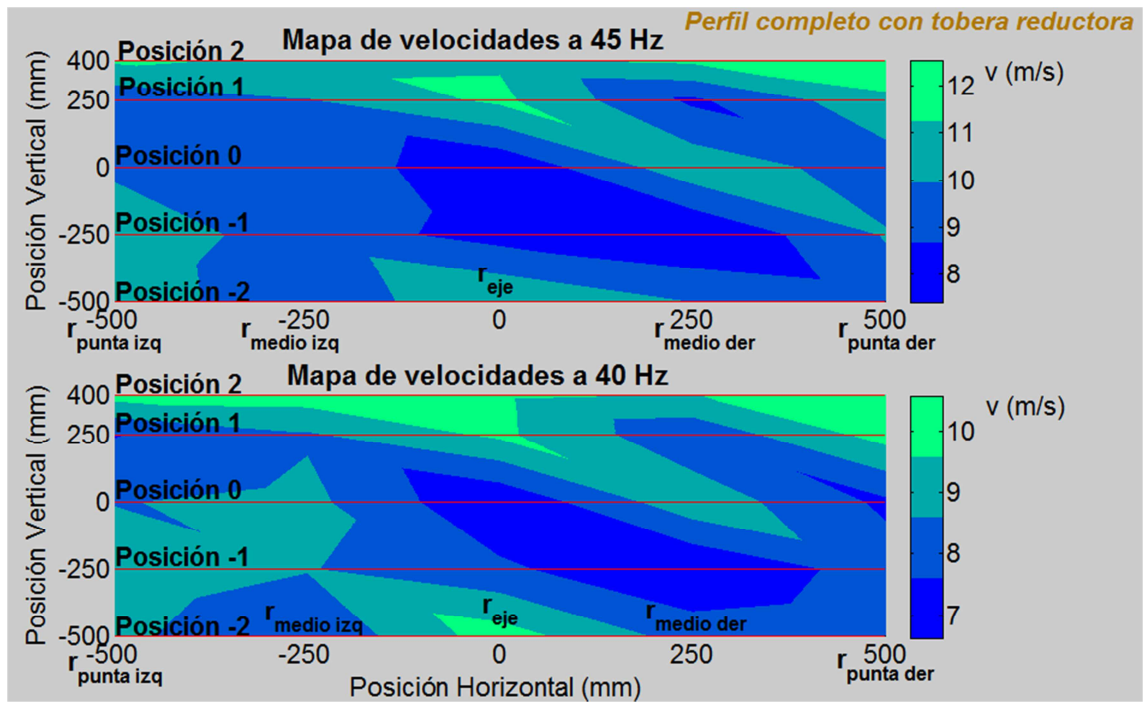


Figura 3.19. Mapa de velocidades de perfil completo con tobera reductora II

3.4.5. Comparativa de los perfiles de viento completos

En este apartado se comparan todos los resultados de velocidad de viento obtenidos en el mapa completo de velocidades, es decir, los resultados del perfil izquierdo y los del perfil derecho.

• Grado de homogeneidad de velocidad de viento

No está claro en cuál de los dos perfiles de viento completos la velocidad de viento es más uniforme. Para ello, se puede calcular la desviación típica de manera análoga al apartado 3.4.2. De tal forma que los resultados son los siguientes:

<i>Homogeneidad del viento. Cálculo de σ</i>							
Perfil completo con rejilla intermedia							
f_{ventiladores} (Hz)	$r_{punta\ izq}$	$r_{medio\ izq}$	r_{eje}	$\bar{\sigma}_{perfil\ izq}$	$r_{medio\ der}$	$r_{punta\ der}$	$\bar{\sigma}_{perfil\ completo}$
13	0,41	0,35	0,22	0,33	0,22	0,21	0,284
15	0,38	0,37	0,24	0,33	0,26	0,21	0,29
20	0,77	0,55	0,29	0,54	0,44	0,30	0,47
25	0,88	0,73	0,38	0,66	0,63	0,40	0,60
30	1,04	0,75	0,53	0,77	1,05	0,57	0,79
35	0,97	0,47	0,55	0,66	1,28	0,78	0,81
40	1,11	0,81	1,11	1,01	1,65	0,85	1,11
45	1,24	0,72	1,26	1,08	1,65	1,26	1,23
50	1,51	0,74	1,38	1,21	2,01	1,52	1,43
				$\bar{\sigma}_{perfil\ izq}$	0,73		$\bar{\sigma}_{perfil\ completo}$
							0,78

<i>Homogeneidad del viento. Cálculo de σ</i>							
Perfil completo con tobera reductora							
f_{ventiladores} (Hz)	$r_{punta\ izq}$	$r_{medio\ izq}$	r_{eje}	$\bar{\sigma}_{perfil\ izq}$	$r_{medio\ der}$	$r_{punta\ der}$	$\bar{\sigma}_{perfil\ completo}$
13	0,27	0,41	0,44	0,38	0,63	0,74	0,50
15	0,22	0,42	0,64	0,43	0,67	0,75	0,54
20	0,43	0,56	0,93	0,64	0,97	1,00	0,78
25	0,56	0,48	1,04	0,69	1,14	1,23	0,89
30	0,69	0,64	1,32	0,88	1,20	1,28	1,02
35	0,84	0,73	1,45	1,01	1,38	1,29	1,14
40	0,88	0,85	1,47	1,07	1,17	1,31	1,14
45	0,95	0,79	1,87	1,21	1,67	1,35	1,33
50	0,94	0,85	2,18	1,32	1,78	1,31	1,41
				$\bar{\sigma}_{perfil\ izq}$	0,85		$\bar{\sigma}_{perfil\ completo}$
							0,97

Tabla 3.16. Homogeneidad de viento en perfiles completos

Se obtiene una desviación típica media total en los ensayos *con rejilla intermedia* de 0,78. Mientras que la desviación típica media total *con tobera reductora* es de 0,97. Por lo tanto, se concluye que la **mayor uniformidad de viento se consigue en el escenario con rejilla intermedia**.

Nótese que en ambos casos, **a medida que aumenta** la frecuencia de ventiladores, es decir, aumenta **la velocidad de viento, el valor de desviación típica aumenta**.

A partir de una frecuencia de ventiladores de **45 Hz**, en **ambos** escenarios se cumple que hay **mayor heterogeneidad en las velocidades de radio y punta derecha, que en estas mismas velocidades del perfil izquierdo**. Para los demás ensayos, este hecho se cumple habitualmente.

• Velocidades medias en el plano vertical

Tal y como se realizó para el caso de los perfiles izquierdo con y sin rejilla intermedia, se realiza el mismo análisis para los perfiles completos de viento:

Velocidades medias en plano vertical. Perfil completo con rejilla intermedia									
	13 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz
Posición 2	1,30	1,63	2,14	2,81	3,51	4,26	4,99	5,81	6,58
Posición 1	1,34	1,58	2,20	2,68	3,66	4,48	5,32	6,31	6,72
Posición 0	1,25	1,55	2,06	2,78	3,70	4,78	5,49	6,36	7,38
Posición -1	1,53	1,79	2,57	3,17	4,05	4,95	5,68	6,43	7,12
Posición -2	1,62	1,95	2,84	3,71	4,58	5,49	6,55	7,70	8,57
Promedio	1,41	1,70	2,36	3,03	3,90	4,79	5,59	6,52	7,27

Tabla 3.17. Velocidades medias en plano vertical. Perfil completo con rejilla intermedia

Velocidades medias en plano vertical. Perfil completo con tobera reductora									
	13 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	30 Hz	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz
Posición 2	3,12	3,48	4,92	6,18	7,52	8,94	9,99	11,57	12,94
Posición 1	2,77	3,22	4,26	5,46	6,60	7,67	8,76	9,90	11,30
Posición 0	1,95	2,21	3,21	4,24	5,42	6,62	8,20	9,50	10,63
Posición -1	2,34	2,53	3,57	4,80	5,85	6,99	7,97	9,07	10,08
Posición -2	2,43	2,79	3,75	4,97	6,11	7,43	8,63	9,95	11,04
Promedio	2,52	2,84	3,94	5,13	6,30	7,53	8,71	10,00	11,20

Tabla 3.18. Velocidades medias en plano vertical. Perfil completo con tobera reductora

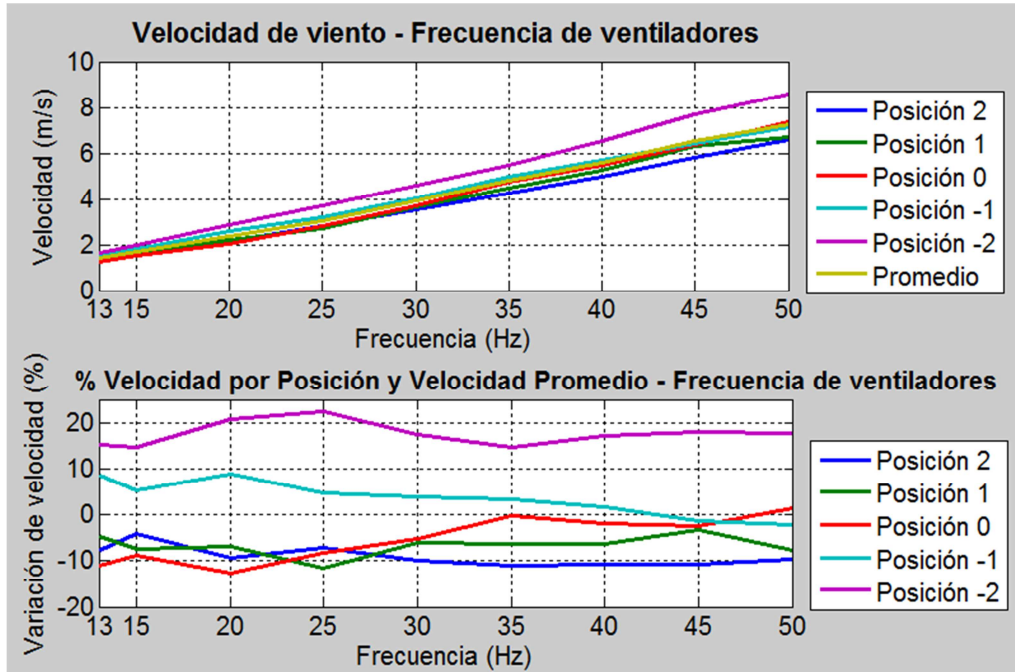
Perfil completo con rejilla intermedia

Figura 3.20. Velocidades medias en plano vertical. Perfil completo con rejilla intermedia

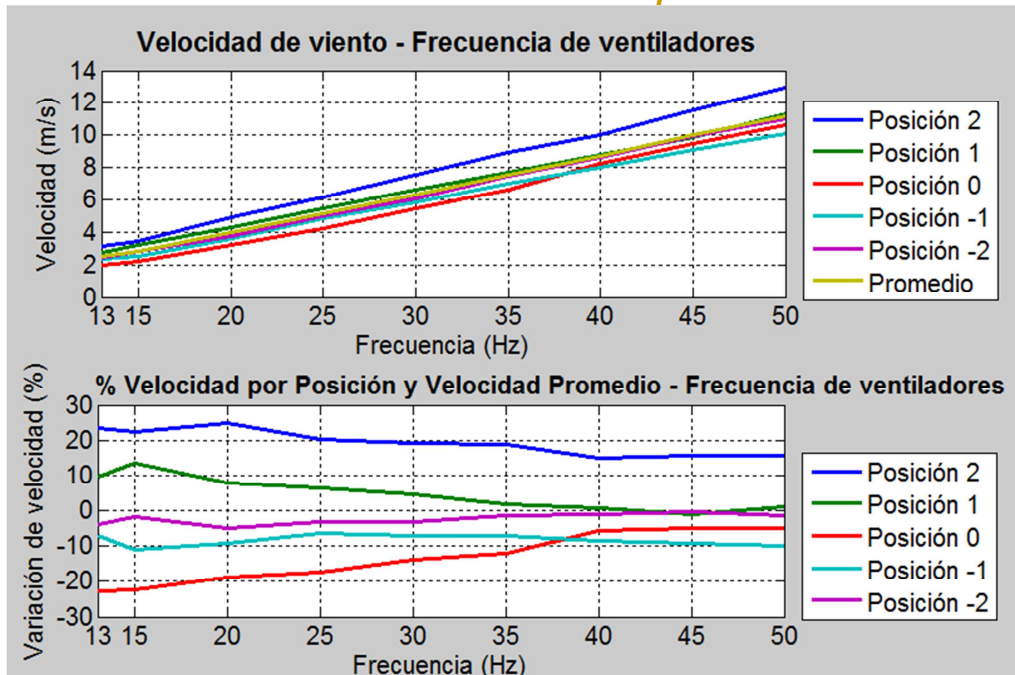
Perfil completo con tobera reductora

Figura 3.21. Velocidades medias en plano vertical. Perfil completo con rejilla intermedia

	Comparativa velocidades medias en plano vertical	
	Con rejilla intermedia	Con tobera reductora
Velocidad máxima	Posición -2	Posición 2
Velocidad mínima	Posición 2: A partir de 30 Hz.	Posición 0: desde 13 Hz hasta 35 Hz. Posición -1: desde 40 Hz a 50 Hz.
Velocidad más cercana a promedio	Posición -1	Posición 1

Tabla 3.19. Comparativa velocidades medias en plano vertical de perfiles completos

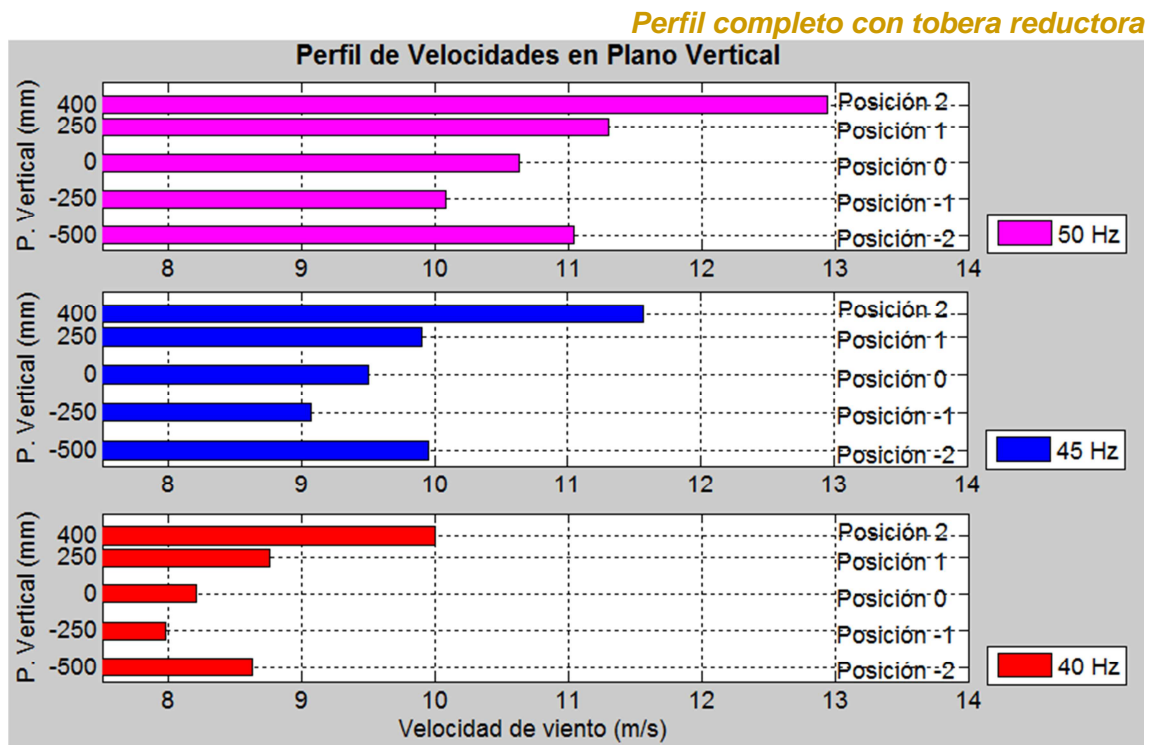


Figura 3.22. Velocidades medias en plano vertical. Perfil completo con tobera reductora

• Velocidades medias en el plano horizontal

De forma análoga al apartado 3.4.2., se analiza el campo de velocidades en el plano horizontal de cada uno de los escenarios considerados:

	Velocidades medias en plano horizontal. Perfil completo con rejilla intermedia								
Frecuencia (Hz)	13	15	20	25	30	35	40	45	50
$v_{punta_izquierdo}$ (m/s)	1,82	2,19	3,20	3,97	4,90	5,85	6,49	7,45	7,78
$v_{medio_izquierdo}$ (m/s)	2,17	2,65	3,41	4,35	5,45	6,27	7,12	7,90	8,80
v_{eje} (m/s)	0,73	0,87	1,35	1,85	2,64	3,62	4,56	5,69	6,52
$v_{medio_derecho}$ (m/s)	0,95	1,26	1,63	2,18	3,05	4,13	5,02	6,05	7,38
$v_{punta_derecho}$ (m/s)	0,77	0,81	1,25	1,67	2,18	2,80	3,52	4,37	4,86

Tabla 3.20. Velocidades medias en plano horizontal. Perfil completo con rejilla intermedia

	Velocidades medias en plano horizontal. Perfil completo con tobera reductora								
Frecuencia (Hz)	13	15	20	25	30	35	40	45	50
$v_{punta_izquierdo}$ (m/s)	3,05	3,55	4,68	5,82	6,92	7,90	8,84	10,34	11,58
$v_{medio_izquierdo}$ (m/s)	2,77	3,18	4,39	5,54	6,63	7,69	8,77	9,76	10,57
v_{eje} (m/s)	2,84	3,27	4,39	5,52	6,47	7,57	8,84	9,89	11,12
$v_{medio_derecho}$ (m/s)	2,12	2,26	3,23	4,30	5,55	6,88	8,30	9,60	10,60
$v_{punta_derecho}$ (m/s)	2,20	2,46	3,57	4,97	6,30	7,81	8,93	10,40	12,02

Tabla 3.21. Velocidades medias en plano horizontal. Perfil completo con tobera reductora

	Comparativa velocidades medias en plano horizontal	
	Con rejilla intermedia	Con tobera reductora
Velocidad máxima	$V_{medio\ izq}$	$V_{punta\ der}$
Velocidad mínima	$V_{punta\ der}$	$V_{medio\ der}$ <i>Excepción = 50 Hz: $V_{medio\ izq}$</i>
Secuencia de velocidades	$V_{medio\ izq} > V_{punta\ izq} > \dots > V_{medio\ der} > V_{eje} > V_{punta\ der}$	No sigue una secuencia fija

Tabla 3.22. Comparativa velocidades medias en plano horizontal de perfiles completos

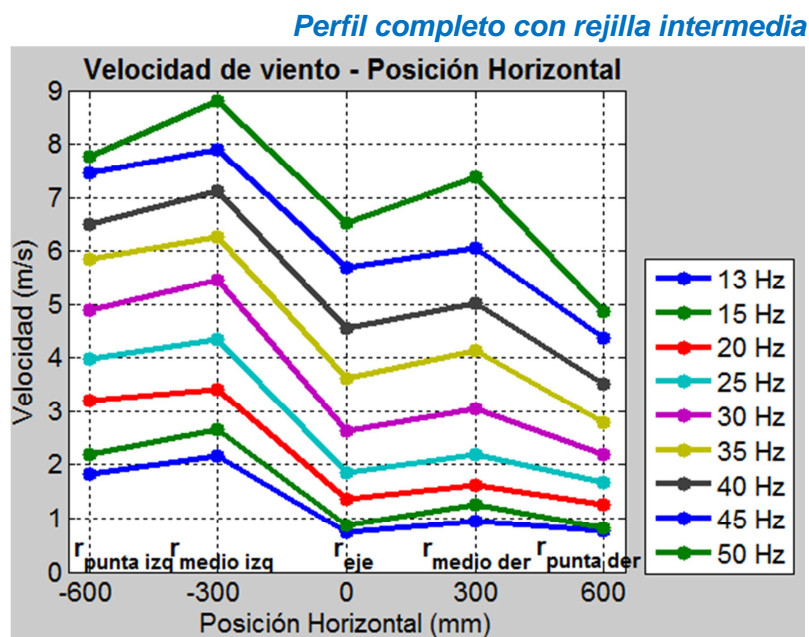


Figura 3.23. Velocidades medias en plano horizontal. Perfil completo con rejilla intermedia

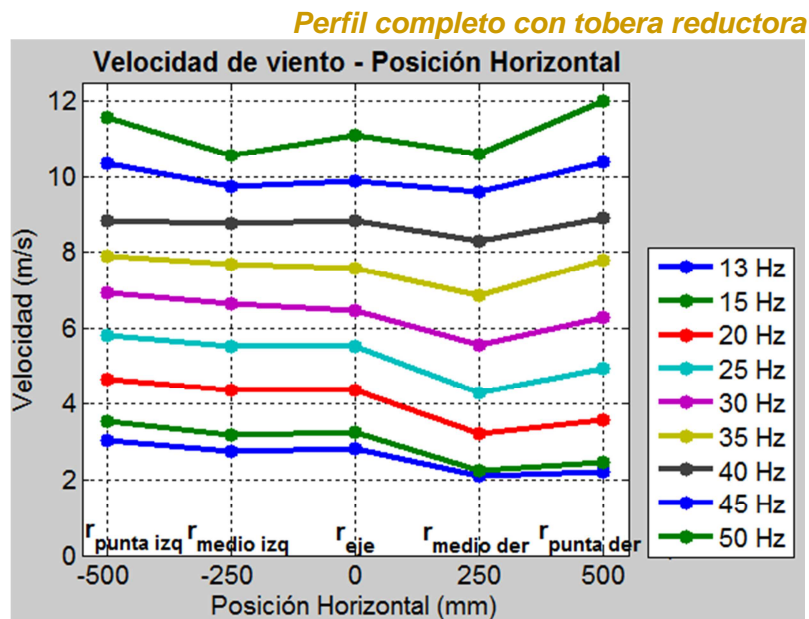


Tabla 3.24. Velocidades medias en plano horizontal. Perfil completo con tobera reductora

• Velocidad promedio de perfiles de viento

Si se atiende al valor de máxima velocidad de viento para el caso con rejilla intermedia, y se multiplica por un **factor de 1,6**, la velocidad esperada al instalar la tobera sería de 11,63 m/s. Así, se observa que **la estimación al diseñar la tobera es correcta**, ya que con tobera reductora se llega a una velocidad promedio de 11,20 m/s, que está muy próximo al valor de 11,63 m/s.

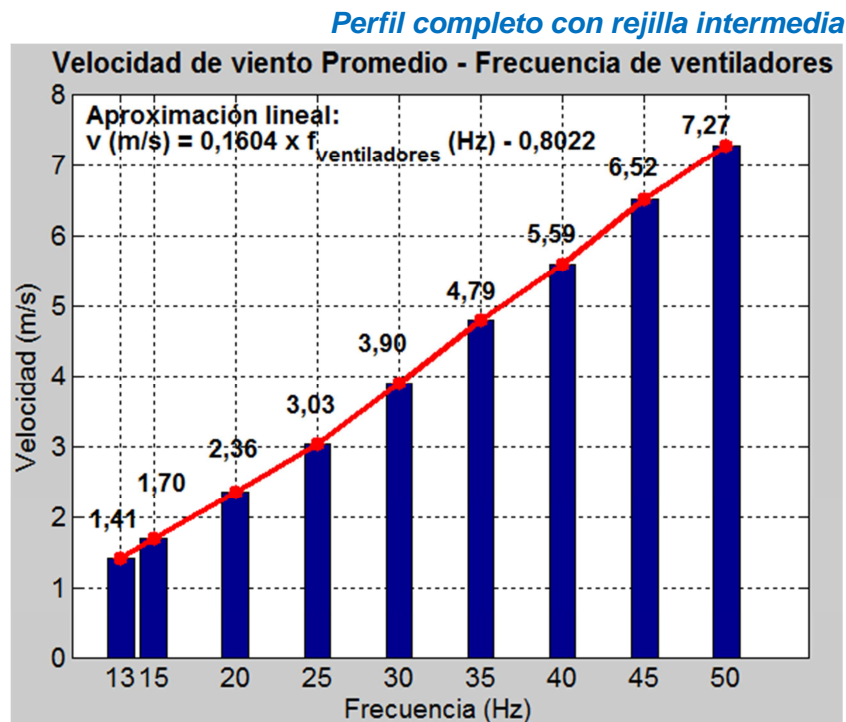


Figura 3.25. Velocidad de viento promedio – Frecuencia ventiladores. P. Completo. con rejilla

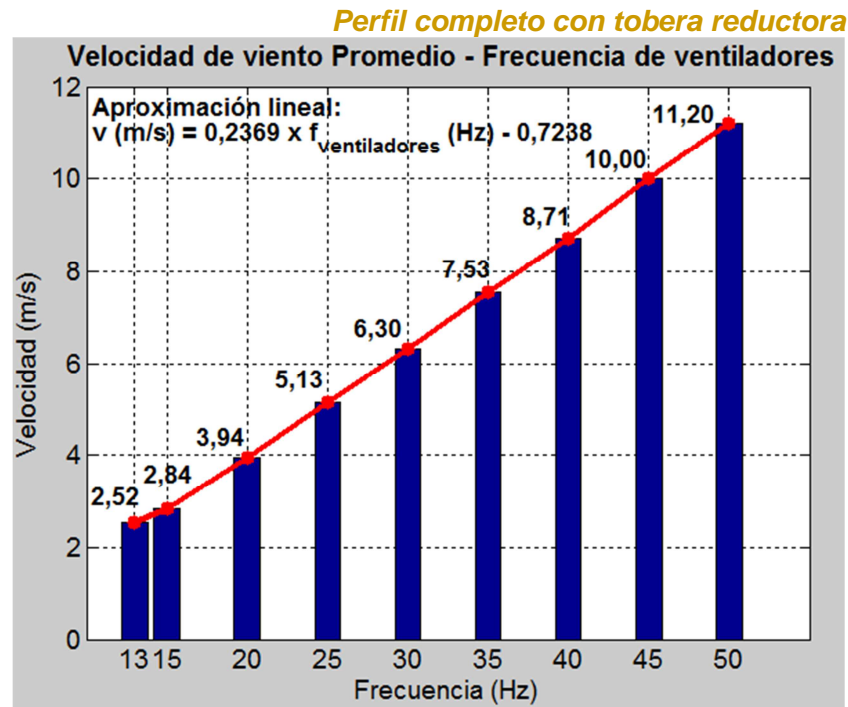


Figura 3.26. Velocidad de viento promedio – Frecuencia ventiladores. P. Completo. con tobera

3.4.6. Conclusiones

- 1) **La estimación de aumentar la velocidad en un 60 % al instalar la tobera reductora se cumple aproximadamente para todas las frecuencias de ventiladores.** Se puede comprobar multiplicando por 1,6 cada uno de las velocidades mostradas en la figura 3.5, y comparar estos resultados con las velocidades que aparecen en la figura 3.6.
- 2) **El campo de velocidades de ambos escenarios no se asemejan.** Es decir, la distribución de las velocidades medias en el plano horizontal y en el plano vertical es diferente en ambos escenarios. Para corroborarlo véase las figuras: 3.20, 3.21, 3.23 y 3.24.
- 3) **Con la tobera, se ha conseguido el objetivo de aumentar la velocidad de viento, obteniendo una homogeneización de viento comparable a la propia del escenario con rejilla intermedia.**

3.5. Análisis eléctrico - mecánico

Para completar el presente apartado se consideran los escenarios con rejilla intermedia y con tobera reductora, concretamente sus perfiles completos de viento, así como su temperatura y presión consideradas en las tablas 3.12 hasta la 3.15.

Para cada posición vertical y para cada frecuencia de ventiladores, se calculan los valores de velocidad de viento promedio, densidad y potencia eólica. Nótese que se muestran estos resultados a partir de la frecuencia de ventiladores de 20 Hz, frecuencia mínima a partir de la cual se enciende el controlador del aerogenerador. Esto no querrá decir que empiece a generarse potencia eléctrica (véase capítulo siguiente).

• Velocidad de viento proyectada en área de barrido del aerogenerador DS – 300.

Para realizar un análisis eléctrico – mecánico más preciso, se va a considerar la velocidad de viento proyectada el área de barrido por el aerogenerador DS – 300. Para ello, ha sido necesario medir las posiciones de los anemómetros con respecto al área de barrido de las palas del aerogenerador. Así, se muestra la siguiente área proyectada:

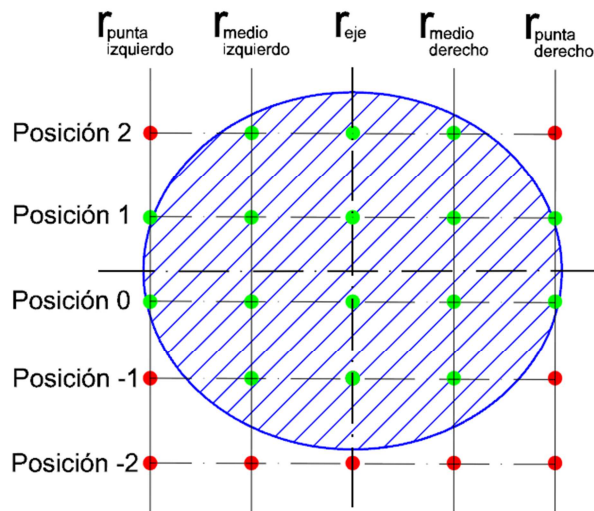


Figura 3.27. Posición de anemómetros respecto al área barrida por aerogenerador DS – 300

Las posiciones en verde serán las incluidas en el presente análisis de velocidades, mientras que se descartan las medidas de las posiciones en rojo.

Así, se espera que la **velocidad promedio considerada disminuya** con respecto a las promedios calculadas en el apartado 3.4.5. Esto sucederá tanto en el caso con rejilla intermedia como con el de tobera reductora. Por ejemplo, si nos fijamos en la velocidad media en la Posición -2 que ahora hay que descartar, ésta era la máxima para el caso con rejilla intermedia, y una de las mayores velocidades con la tobera reductora.

Análisis eléctrico – mecánico I. Perfil completo con rejilla intermedia									
50 Hz	\bar{v} (m/s)	ρ (kg/m³)	P_o (W)		30 Hz	\bar{v} (m/s)	ρ (kg/m³)	P_o (W)	
Posición 2	7,21	1,23	237,83		Posición 2	3,15	1,23	19,90	
Posición 1	6,55	1,23	178,44		Posición 1	3,42	1,23	25,50	
Posición 0	7,36	1,23	252,59		Posición 0	3,57	1,23	28,92	
Posición -1	7,72	1,24	293,52		Posición -1	4,34	1,24	52,28	
45 Hz	\bar{v} (m/s)	ρ (kg/m³)	P_o (W)		25 Hz	\bar{v} (m/s)	ρ (kg/m³)	P_o (W)	
Posición 2	5,87	1,23	129,13		Posición 2	2,45	1,23	9,36	
Posición 1	6,11	1,23	145,48		Posición 1	2,49	1,23	9,87	
Posición 0	6,27	1,23	157,07		Posición 0	2,65	1,23	11,77	
Posición -1	6,73	1,24	195,44		Posición -1	3,19	1,24	20,81	
40 Hz	\bar{v} (m/s)	ρ (kg/m³)	P_o (W)		20 Hz	\bar{v} (m/s)	ρ (kg/m³)	P_o (W)	
Posición 2	4,96	1,24	77,96		Posición 2	1,94	1,23	4,65	
Posición 1	5,00	1,23	79,45		Posición 1	2,04	1,23	5,38	
Posición 0	5,38	1,23	99,20		Posición 0	1,93	1,23	4,57	
Posición -1	6,08	1,24	143,85		Posición -1	2,49	1,24	9,86	
35 Hz	\bar{v} (m/s)	ρ (kg/m³)	P_o (W)						
Posición 2	4,25	1,23	48,86						
Posición 1	4,22	1,23	47,93						
Posición 0	4,63	1,23	63,03						
Posición -1	5,22	1,24	91,00						

Tabla 3.23. Análisis eléctrico – mecánico I en perfil completo con rejilla intermedia

Para continuar con el análisis mecánico – eléctrico del aerogenerador, para cada una de las frecuencias de f.e.m. de ventiladores, se calculan los valores promedio siguientes: velocidad de viento promedio, velocidad de giro, potencia eólica, potencia eléctrica, coeficiente de potencia y velocidad específica.

Análisis eléctrico – mecánico II. Perfil completo con rejilla intermedia						
Frecuencia (Hz)	\bar{v} (m/s)	n (rpm)	\bar{P}_o (W)	P (W)	C_p	λ
50	7,00	532,6	240,59	42,36	0,176	4,94
45	6,16	479,6	156,78	30,32	0,193	5,05
40	5,25	413,8	100,11	19,09	0,191	5,12
35	4,49	357,8	62,71	14,20	0,226	5,17
30	3,56	295,8	31,65	9,04	0,285	5,39
25	2,65	232,2	12,95	3,32	0,256	5,68
20	2,06	176,3	6,11	1,29	0,211	5,55

Tabla 3.24. Análisis eléctrico – mecánico II en perfil completo con rejilla intermedia

De esta forma se puede construir la siguiente gráfica:

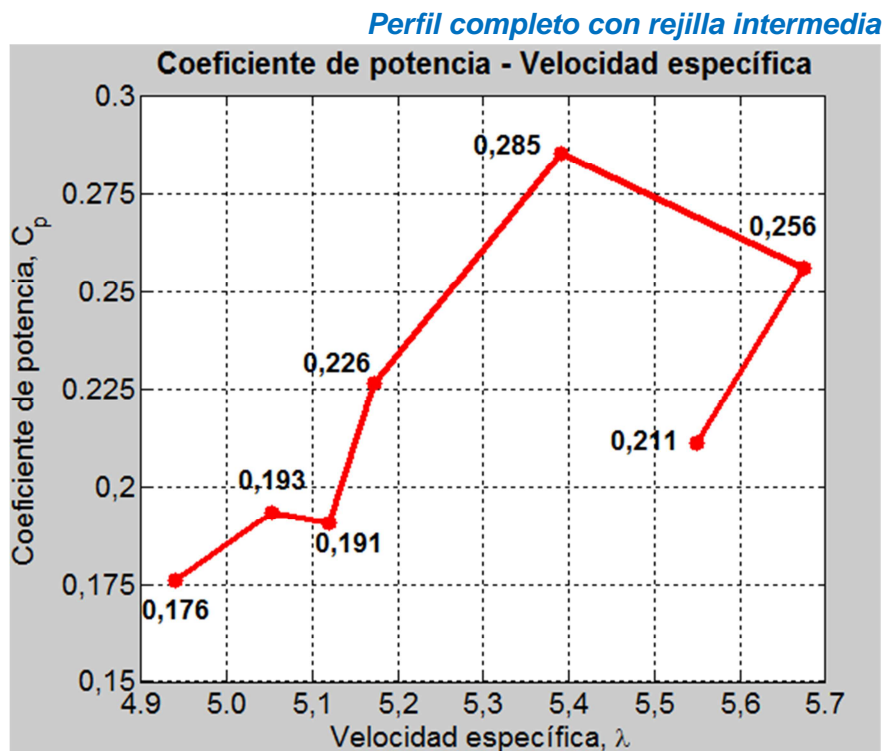


Figura 3.28. Coeficiente de potencia – Velocidad específica en perfil completo con rejilla

Si se compara la anterior gráfica, con una curva teórica de coeficiente de potencia – velocidad específica para un aerogenerador Darrieus – Savonius, se corrobora que su velocidad específica y coeficiente de potencia están dentro de su intervalo de valores esperado:

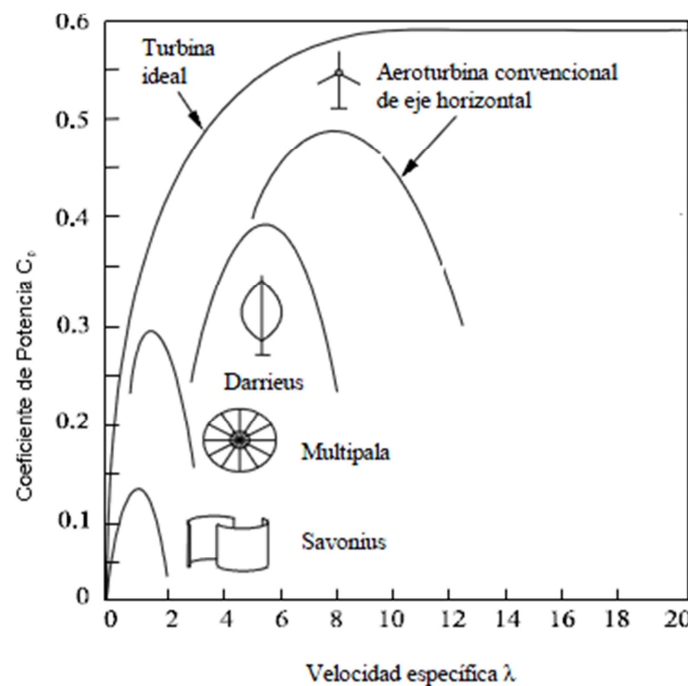


Figura 3.28. Curva teórica Coeficiente de potencia – Velocidad específica

El coeficiente de potencia obtenido es mucho menor que para el caso del rotor Darrieus. Esto es debido al bajo coeficiente de potencia del rotor Savonius hace que disminuya notablemente el C_P del aerogenerador DS – 300. Así, se estiman los siguientes valores teóricos de λ y C_P para el aerogenerador DS – 300 (híbrido entre rotor Darrieus y Savonius):

$$\lambda_{\text{Savonius-Darrieus}} \approx [3-7]; C_{P_Savonius-Darrieus} \approx [0,07-0,3]$$

A continuación, de forma análoga al escenario con rejilla intermedia, se hace el análisis eléctrico para el caso con tobera reductora:

Análisis eléctrico – mecánico I. <i>Perfil completo con tobera reductora</i>									
50 Hz	\bar{v} (m/s)	ρ (kg/m³)	P_o (W)		30 Hz	\bar{v} (m/s)	ρ (kg/m³)	P_o (W)	
Posición 2	12,45	1,19	1183,83		Posición 2	7,45	1,19	253,03	
Posición 1	11,34	1,19	895,87		Posición 1	6,58	1,19	174,47	
Posición 0	10,47	1,21	714,52		Posición 0	5,51	1,20	103,34	
Posición -1	9,25	1,19	486,17		Posición -1	5,63	1,19	109,86	
45 Hz	\bar{v} (m/s)	ρ (kg/m³)	P_o (W)		25 Hz	\bar{v} (m/s)	ρ (kg/m³)	P_o (W)	
Posición 2	11,17	1,19	857,15		Posición 2	6,15	1,19	142,73	
Posición 1	9,95	1,19	605,00		Posición 1	5,49	1,19	101,56	
Posición 0	9,39	1,20	512,24		Posición 0	4,36	1,20	51,20	
Posición -1	8,31	1,19	352,26		Posición -1	4,53	1,19	57,25	
40 Hz	\bar{v} (m/s)	ρ (kg/m³)	P_o (W)		20 Hz	\bar{v} (m/s)	ρ (kg/m³)	P_o (W)	
Posición 2	9,79	1,19	578,08		Posición 2	4,93	1,19	73,66	
Posición 1	8,73	1,18	406,52		Posición 1	4,31	1,19	49,24	
Posición 0	8,18	1,20	337,86		Posición 0	3,34	1,20	22,98	
Posición -1	7,70	1,19	281,91		Posición -1	3,59	1,19	28,47	
35 Hz	\bar{v} (m/s)	ρ (kg/m³)	P_o (W)						
Posición 2	8,72	1,19	405,39						
Posición 1	7,65	1,18	273,62						
Posición 0	6,66	1,20	182,58						
Posición -1	6,68	1,19	183,36						

Tabla 3.25. Análisis eléctrico – mecánico I en perfil completo con tobera reductora

Análisis eléctrico – mecánico I. Perfil completo con tobera reductora						
Frecuencia (Hz)	\bar{v} (m/s)	n (rpm)	\bar{P}_o (W)	P (W)	C_p	λ
50	10,98	700,1	820,10	131,33	0,160	4,14
45	9,70	634,9	581,66	95,62	0,164	4,25
40	8,53	554,6	401,09	64,71	0,161	4,22
35	7,36	476,7	261,24	41,19	0,158	4,21
30	6,22	403,5	160,17	26,67	0,167	4,21
25	5,06	327,1	88,18	14,66	0,166	4,19
20	3,95	252,1	43,59	6,94	0,159	4,14

Tabla 3.26. Análisis eléctrico – mecánico II en perfil completo con tobera reductora

De esta forma se puede construir la siguiente gráfica:

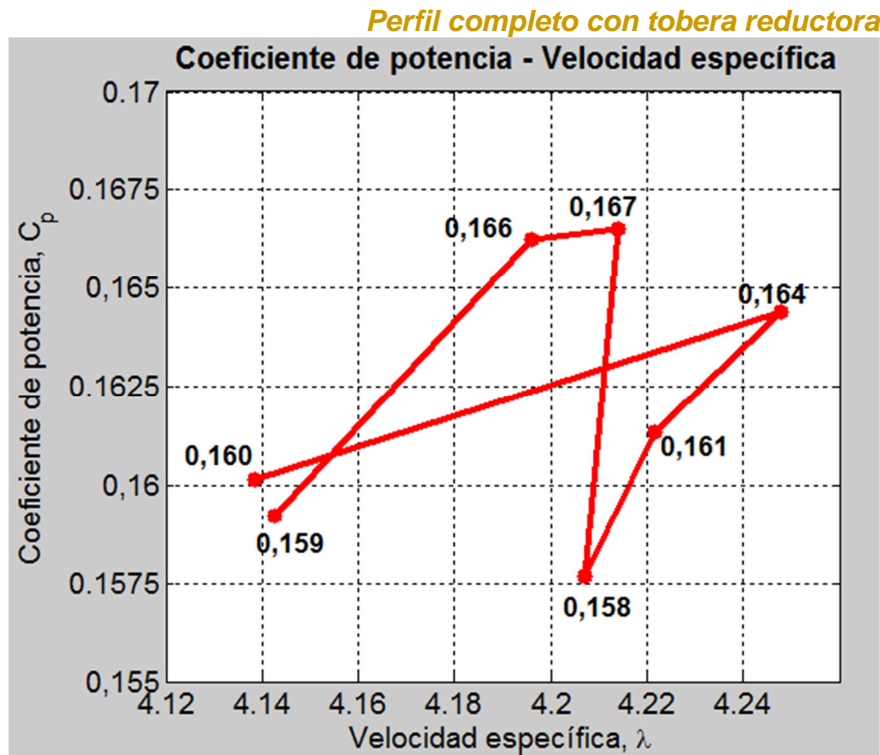


Figura 3.29. Coeficiente de potencia – Velocidad específica en perfil completo con tobera

• Conclusiones:

- El aerogenerador DS – 300 **opera en su intervalo de λ y C_p esperado**, en ambos escenarios.
- No se ha obtenido una curva parabólica en la gráfica $C_p - \lambda$. Sin embargo, se ha obtenido una **uniformidad de los valores λ y C_p** en cada uno de los casos.
- Véase en el **siguiente capítulo** la comparación entre la **potencia eléctrica real**, con la **potencia eléctrica garantizada por el fabricante** para cada velocidad de viento media recibida por el aerogenerador DS – 300

Capítulo 4

Análisis del comportamiento eléctrico del aerogenerador

4.1. Introducción

En este capítulo se realiza un estudio completo del comportamiento eléctrico del aerogenerador DS – 300.

En primer lugar, se realiza una breve descripción teórica de los equipos que forman el esquema eléctrico del sistema.

A continuación, se detallan los cálculos que se han utilizado para justificar los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos.

Entonces, una vez conocido los componentes del sistema eléctrico y sus leyes teóricas que describen su funcionamiento, se explica la planificación de los ensayos.

Por último, se describen cada uno de los ensayos realizados, los resultados obtenidos y las conclusiones. Además, se compararán los resultados experimentales con los resultados teóricos. Estos resultados teóricos se refieren a los detallados en el apartado 4.3. *Cálculos justificativos*, así como los datos de potencia eléctrica que garantiza el fabricante.

4.2. Descripción teórica del sistema eléctrico

Un aerogenerador es una máquina que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. Para ello, se emplean elementos mecánicos, normalmente palas (por ejemplo en el tipo Savonius se utilizan dos semicilindros), que transmiten la energía del viento al rotor de un generador.

El esquema inicial del presente sistema eléctrico es el siguiente:

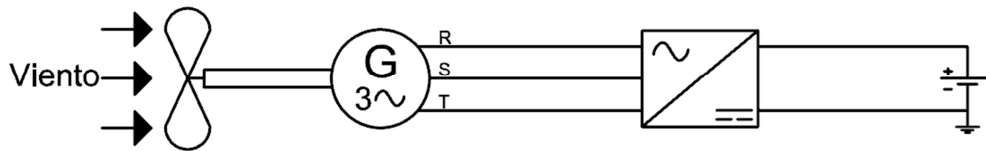


Figura 4.1. Esquema eléctrico inicial del sistema eólico

A continuación se describen brevemente los principales componentes del presente esquema eléctrico.

4.2.1. Generador eléctrico

La máquina eléctrica utilizada en el DS – 300 es un **generador síncrono (o alternador) trifásico de imanes permanentes**.

Un generador es una máquina eléctrica que transforma la energía mecánica en eléctrica. La acción se desarrolla por el movimiento de una bobina en un campo magnético, resultando una f.e.m. (fuerza electromotriz) inducida que al aplicarla a un circuito externo produce una corriente que interacciona con el campo y desarrolla una fuerza mecánica que se opone al movimiento. En consecuencia, el generador necesita una energía mecánica de entrada para producir la energía eléctrica correspondiente. En nuestro caso, esta energía mecánica es producida por un movimiento de rotación del rotor.

4.2.1.1. Frecuencia de máquina – frecuencia de la f.e.m.

Recordar que la relación entre las r.p.m. de la máquina, n , y la frecuencia de la f.e.m., f :

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = p \cdot \omega_m = p \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \Rightarrow f = \frac{n \cdot p}{60}$$

siendo $p = n^\circ$ de pares de polos.

En este tipo de máquinas, el flujo inductor es constante, es decir, independiente del tiempo, indica que la frecuencia de la corriente que alimenta este devanado es $f_1 = 0$. Además, como el dispositivo de conexión al circuito exterior es mediante conexiones fijas, la frecuencia en el circuito exterior, f_L , es igual a la frecuencia del inducido, f_2 :

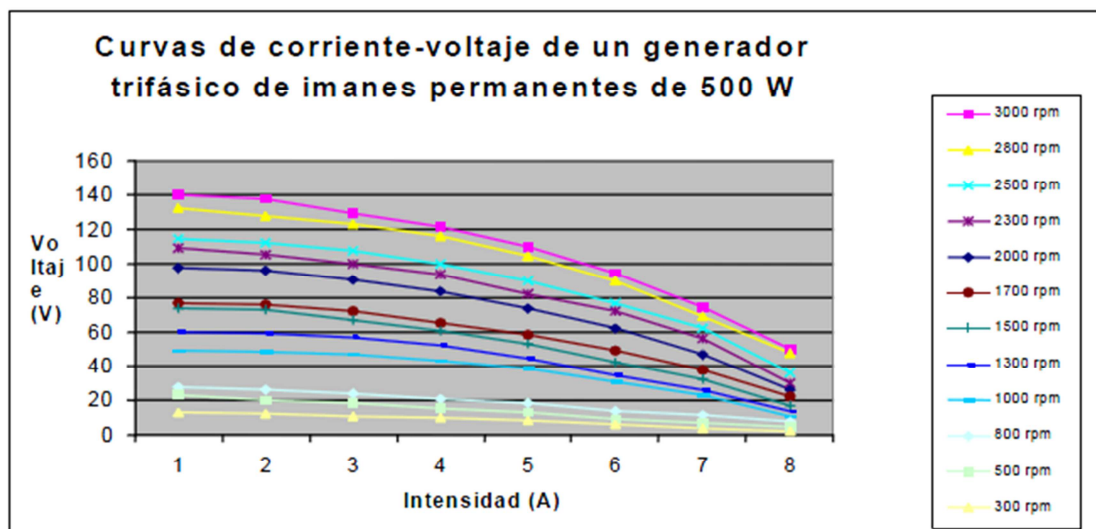
$$f_L = f_2 = \pm \frac{n \cdot p}{60}$$

Así, la frecuencia obtenida es proporcional a la velocidad de giro y al número de pares de polos de la máquina. Además, la corriente que circula por el circuito exterior sea de la misma forma que la que se obtiene en la espira del inducido.

4.2.1.2. Efecto de imanes permanentes

Un alternador de imanes permanentes es un generador síncrono en el que se ha sustituido el bobinado de excitación, normalmente en el rotor, por un sistema formado por imanes permanentes que suministran un *campo de excitación constante*.

En un alternador convencional, se controla la tensión y frecuencia con la intensidad de excitación o con la velocidad de giro del rotor. En un alternador de imanes permanentes, la excitación es constante, por lo que al cargar el generador aumentando la velocidad de giro y al cambiar el nivel de tensión en la carga (por ejemplo con batería), la *relación teórica tensión – intensidad* de salida del alternador es la siguiente:



Fuente: www.ute.com.uy

Figura 4.2. Curvas V – I de un generador trifásico de imanes permanentes comercial

Véase el apartado 4.2.1.4. *Modelo eléctrico equivalente del alternador trifásico* en el que se justifica este comportamiento propio de un generador síncrono de imanes permanentes.

4.2.1.3. Ventajas de utilizar imanes permanentes:

- No se necesita de sistema de excitación. Por lo tanto, se puede llegar a ahorrar hasta un 20 % de energía.
- Se eliminan las escobillas en el sistema de excitación del inductor. También se eliminan los sistemas reductores, con lo que hay un ahorro en mantenimiento y en espacio.
- Al ser una fuente de energía independiente del generador, puede servir para suministrar energía a sistemas auxiliares del generador principal.
- Adecuado para sistemas aislados, por ejemplo aerogeneradores de baja potencia, en los que no es crítica una disminución de la tensión cuando aumenta la velocidad de giro. Además, para solucionar esto, se puede aplicar electrónica a la salida del generador para convertir un rango de tensiones variable en tensión constante.

4.2.1.4. Modelo eléctrico equivalente del alternador trifásico

Un generador síncrono trifásico dispone de tres devanados iguales en el estator, dispuestos 120° eléctricos entre cada uno de ellos, constituyendo en conjunto un sistema trifásico equilibrado en f.e.m.:

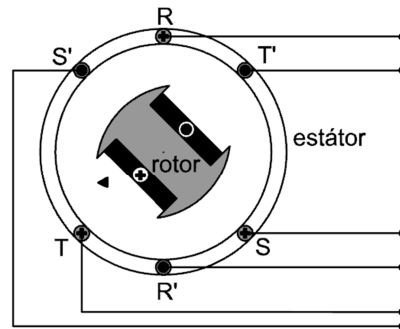


Figura 4.3. Alternador trifásico de un par de polos salientes

A) Generador en vacío

El devanado del rotor, alimentado con corriente continua, induce al girar con velocidad de rotación constante ω_m (rad/s), las tensiones en las bobinas del estátor dadas por:

$$E_{RR'} = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega_m \cdot t)$$

$$E_{SS'} = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega_m \cdot t - 120^\circ)$$

$$E_{TT'} = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega_m \cdot t + 120^\circ)$$

Siendo: $E = k \cdot \omega \cdot I_{exc}$

$k = \text{constante}; \omega = 2 \cdot \pi \cdot f = p \cdot \omega_m$;

$I_{exc} = \text{intensidad de devanado rotórico}$

Téngase en cuenta que en el caso de imanes permanentes, la intensidad de excitación es constante, y por tanto ésta no podrá ser modificada para variar E .

Modelo del generador síncrono trifásico en vacío:

$$E_R = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$E_S = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega \cdot t - 120^\circ)$$

$$E_T = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ)$$

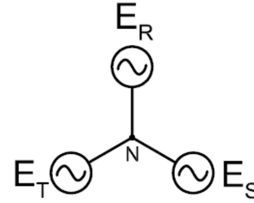


Figura 4.4. Modelo alternador trifásico en vacío

B) Generador en carga. Modelo en estado estable

Si se conecta una carga en bornes del generador síncrono, habrá una disminución de tensión en bornes de generador, V (véase figura 4.6), con respecto al obtenido en el ensayo en vacío, E . Además, circularán intensidades alternas I_R , I_S e I_T de frecuencia f por los devanados estatóricos:

$$I_R = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi)$$

$$I_S = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega \cdot t - 120^\circ - \varphi)$$

$$I_T = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega \cdot t - 240^\circ - \varphi)$$

Estas intensidades desfasadas 120° en el espacio y 120° en el tiempo, y crean un campo magnético giratorio B_s , de amplitud constante que gira con velocidad ω . Esta pulsación eléctrica suele ser distinta a la obtenida en el ensayo en vacío.

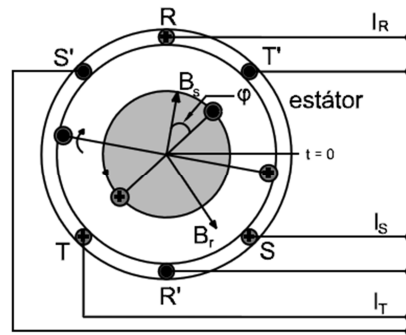


Figura 4.5. Reacción del inducido en el generador síncrono

El campo magnético original B_r se ve modificado por la aparición de este nuevo campo magnético B_s . Este fenómeno es conocido como **“Reacción del inducido”**. Así, el campo magnético en el estátor se obtiene por la proyección del vector B_s en la dirección de B_r . Entonces, se pueden modificar los valores de amplitud, fase y frecuencia resultante de la tensión en bornes de generador, V , con respecto al obtenido en el ensayo en vacío, E .

C) Modelo simplificado de un generador síncrono en estado estacionario

R = resistencia del devanado del estátor

X_s = reactancia síncrona, que se obtiene a partir del ensayo de cortocircuito, y modela todos los flujos originados por el estátor.

$E = k \cdot \omega \cdot I_{exc}$ se obtiene a partir del ensayo en vacío.

$R \ll X_s$

El circuito monofásico equivalente de cualquier máquina síncrona en régimen estacionario es el siguiente:

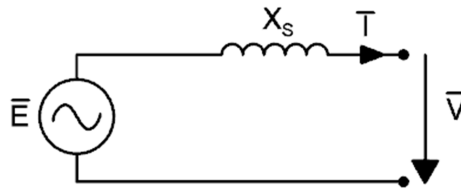


Figura 4.6. Circuito monofásico equivalente de una máquina síncrona en régimen estacionario

Si se conecta una carga resistiva pura, R, en bornes de generador, el alternador funciona con una corriente inductiva en el inducido con un desfase de φ grados. Además, la ecuación que rige este caso es la siguiente:

$$\bar{E} = \bar{V} + \bar{I} \cdot jX_s + \bar{I} \cdot R$$

El diagrama fasorial monofásico del alternador en ese caso sería el siguiente:

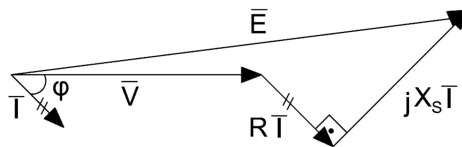
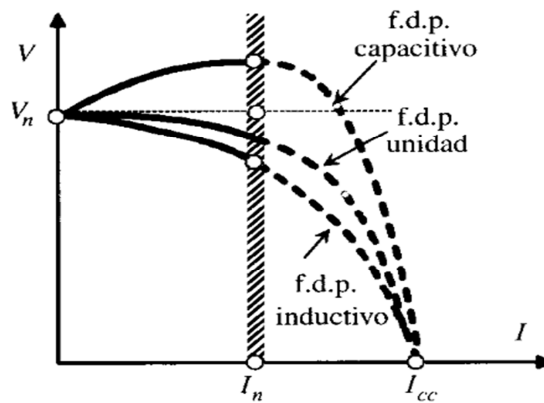


Figura 4.7. Diagrama fasorial monofásico del alternador trifásico para carga resistiva

La curva que representa la tensión en bornes de generador en función de la corriente de la carga, para una intensidad de excitación constante, se denomina “**Curva característica exterior**”:



Fuente: “Máquinas eléctricas” – Autor: Jesús Fraile Mora

Figura 4.8. Curva característica exterior de un generador

Descartando el fdp capacitivo, que nunca puede darse en el presente sistema eléctrico, se observa como la intensidad de carga, I , aumenta conforme disminuye la tensión en bornes de generador, V . Si fijamos una rotación fija del aerogenerador DS – 300, se tiene que el parámetro E permanece constante: $E = k \cdot \omega \cdot I_{exc}$

Recordar la ecuación: $\bar{E} = \bar{V} + \bar{I} \cdot jX_s + \bar{I} \cdot R$ y tener en cuenta que en el presente sistema eléctrico, se puede sustituir la carga resistiva R , por una impedancia equivalente, Z_{eq} , que permanece prácticamente constante:

$$\bar{Z}_{eq} = \bar{Z}_{controlador} + \bar{Z}_{bateria}$$

Entonces, atendiendo a la ley de Ohm, $I = (V/Z)$, si aumenta la tensión en bornes de batería, se incrementa la intensidad de carga, I . Por lo tanto, tendrá que disminuir la tensión en bornes del generador, V . Así se justifica teóricamente las figuras 4.8 y 4.2.

D) Control de la potencia activa y reactiva

Una máquina síncrona tiene cuatro variables independientes: f , V , I_{exc} , n . En el presente caso, el alternador trifásico es de imanes permanentes, luego la intensidad de excitación siempre es constante, y no puede ser modificada. Así, en el generador síncrono del DS – 300 se tienen **tres variables independientes: f , V , n**

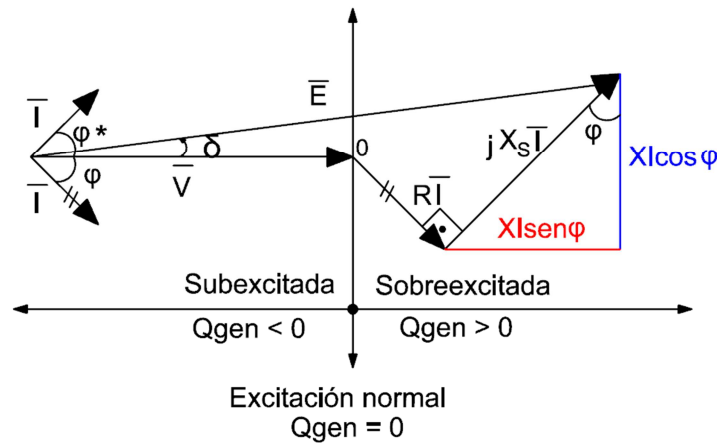


Figura 4.9. Control de la potencia activa y reactiva

Recordar que la potencia aparente generada, S_{gen} , se define como la suma fasorial de la potencia activa, P_{gen} , y de la potencia reactiva, Q_{gen} :

$$\bar{S}_{gen} = P_{gen} + jQ_{gen} = \bar{V} \cdot \bar{I}^*$$

$$P_{gen} = V \cdot I \cdot \cos \phi + jV \cdot I \cdot \sin \phi; Q_{gen} = V \cdot I \cdot \sin \phi$$

$$\bar{S}_{gen} = V \cdot I \cdot \cos \phi + jV \cdot I \cdot \sin \phi$$

Se define:

- **Excitación normal** cuando: $Q_{gen} = 0 \Rightarrow E \cdot \cos \delta = V$
- **Sobreexcitación** cuando: $Q_{gen} > 0 \Rightarrow E \cdot \cos \delta > V$
- **Subexcitación** cuando: $Q_{gen} < 0 \Rightarrow E \cdot \cos \delta < V$

Un generador síncrono puede generar o consumir potencia reactiva dependiendo de su excitación. Esta capacidad está limitada por los márgenes de funcionamiento de la máquina, fundamentalmente la corriente máxima en el devanado de campo y la corriente máxima en el devanado inducido.

Una máquina síncrona sobreexcitada genera potencia reactiva, es decir, genera vars positivos o en retraso (intensidad retrasada con respecto a tensión).

Mientras que una máquina síncrona subexcitada absorbe potencia reactiva, es decir, genera vars negativos o en adelanto (intensidad adelantada con respecto a tensión).

Vamos a obtener la dependencia de la potencia generada con respecto al ángulo de potencia δ :

$$\text{Si } \bar{V} = V \angle 0^\circ \text{ y } \bar{E} = E \angle \delta^\circ$$

Entonces se cumple para el generador que:

$$\bar{E} = \bar{V} + j \cdot X_s \cdot \bar{I} \Rightarrow \bar{I} = \frac{(\bar{E} - \bar{V})}{j \cdot X_s}$$

$$\bar{S}_{gen} = \bar{V} \cdot \bar{I}^* = \frac{V}{X_s} \cdot E \cdot \sin \delta + j \cdot \frac{V}{X_s} \cdot (E \cdot \cos \delta - V)$$

$$P_{gen} = \frac{V}{X_s} \cdot E \cdot \sin \delta$$

$$Q_{gen} = \frac{V}{X_s} \cdot (E \cdot \cos \delta - V)$$

Si se aumenta la velocidad de giro de la máquina n , se incrementará el ángulo δ y con ello la potencia activa generada. Este incremento de δ también tiene influencia en la potencia reactiva generada, aunque es despreciable.

E) Funcionamiento de un alternador de imanes permanentes en una red aislada

Las *conclusiones teóricas* del comportamiento de un generador síncrono de imanes permanentes, ya sea monofásico o trifásico, y bajo carga en una red aislada, son:

1. **El f.d.p. del generador es el f.d.p. de la carga.**
2. **La tensión de salida depende de: la velocidad de giro, la corriente del inducido y el f.d.p. de la carga.**

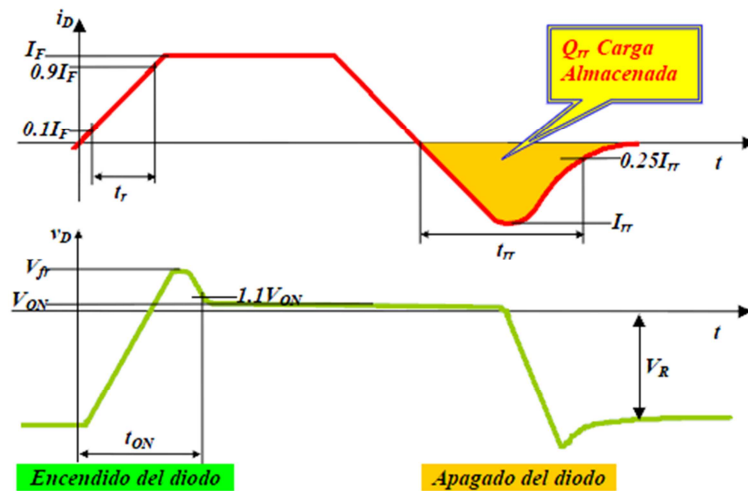
4.2.2. Rectificador trifásico

No se dispone de información del fabricante acerca de la topología del rectificador trifásico utilizado. Sin embargo, se justificará mediante los ensayos que se trata de un **rectificador trifásico no controlado**, es decir, un rectificador trifásico formado por **diodos de potencia**. Si se utilizara control de tensión de salida, y si fuera un aerogenerador de potencia elevada (por ejemplo 1 MW), la rectificación apropiada sería controlada, es decir, rectificación mediante tiristores o mediante transistores.

4.2.2.1. Diodo de potencia

Un diodo semiconductor es una estructura P – N que, dentro de unos límites de tensión y corriente, permite la circulación de corriente en un único sentido. Un diodo de potencia se diferencia con un diodo de señal en la estructura interna, garantizando así mayores intensidades de trabajo y poder soportar tensiones inversas más elevadas.

En nuestro caso, el aspecto fundamental a conocer del diodo de potencia es su *comportamiento dinámico*, es decir, su proceso de conmutación. Ya que este hecho influirá directamente en la forma de onda de la intensidad de salida del alternador trifásico del DS – 300, y en general en la eficiencia eléctrica del sistema. Como se ve en la siguiente figura, la conmutación del diodo de potencia de ON – OFF, y viceversa, no es instantánea:



Fuente: www.itescam.edu.mx

Figura 4.10. Curvas de tensión y corriente de un diodo de potencia en conmutación

4.2.2.2. Tipos de rectificadores trifásicos no controlados

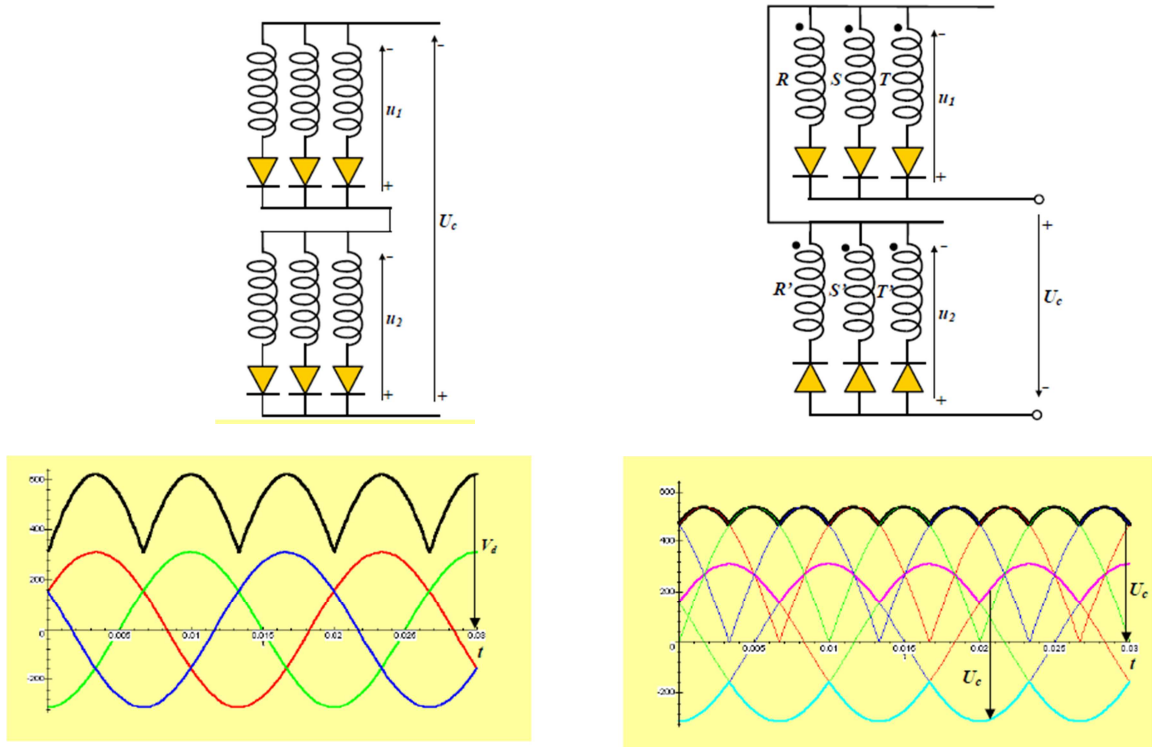
El rectificador de la presente instalación puede atribuirse a una de las siguientes topologías:

- 1) Montaje simple: conexión serie en fase o conexión serie en oposición de fase.
- 2) Montaje en puente.

1) Montaje simple

A continuación se muestran las gráficas en las que aparecen los dos tipos de rectificadores trifásicos no controlados en montaje simple:

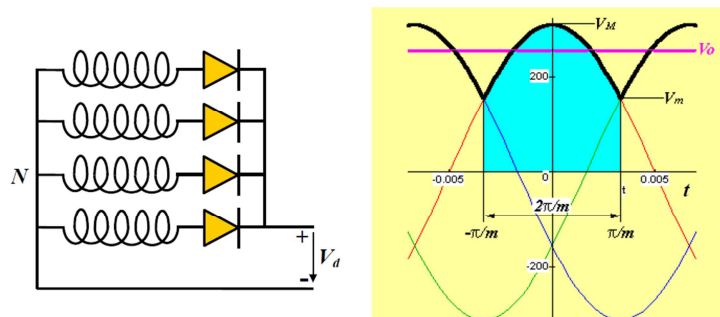
- Conexión Serie en fase.
- Conexión Serie en oposición de fase.



Fuente: www.itescam.edu.mx

Figura 4.11. Rectificador trifásico no controlado de conexión serie en fase (izquierda) y en oposición de fase (derecha).

A continuación, se justifica el valor de tensión media V_o y el valor de tensión eficaz V_{RMS} obtenidos, en el caso de montaje simple en fase:



Fuente: www.itescam.edu.mx

Figura 4.12. Cálculo de V_o en rect. trifásico no controlado de montaje simple (en fase)

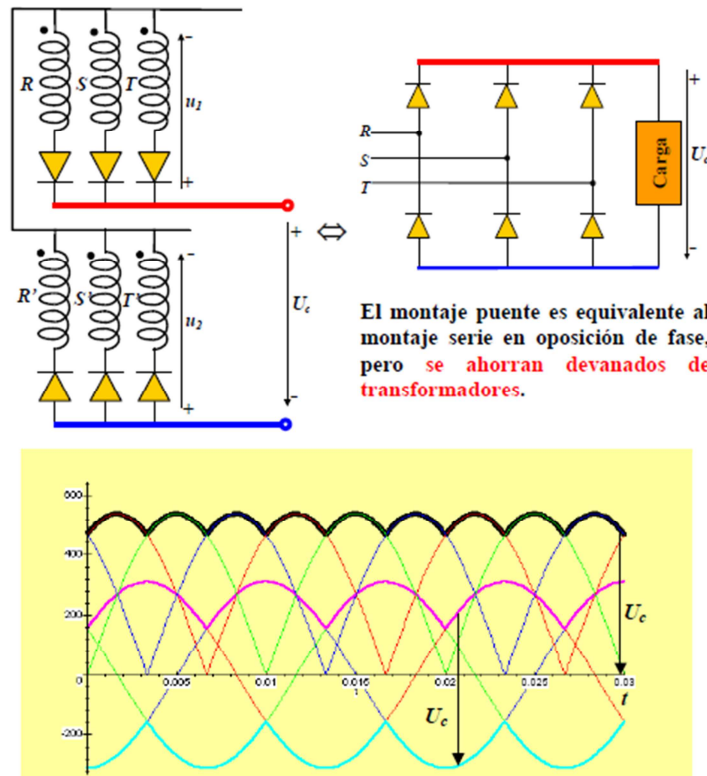
Observando la anterior figura, puede deducirse la tensión estarán formados por una serie de arcos que se repiten periódicamente. De esta forma se puede calcular la tensión media (V_o) obtenida a la salida del rectificador en montaje simple en fase:

$$V_o = \frac{m}{\pi} \cdot V_M \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{m}\right); \text{ en donde } V_M = \text{tensión máxima rectificada}$$

Al ser un sistema trifásico: $m = 3$:
$$V_o = \frac{3}{\pi} \cdot V_M \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{3}\right)$$

2) Montaje en puente

A continuación se muestran las gráficas en las que aparece el esquema eléctrico y la forma de onda de la tensión rectificada del rectificador trifásico no controlado en puente trifásico:



Fuente: www.itescam.edu.mx

Figura 4.13. Rectificador trifásico no controlado en puente

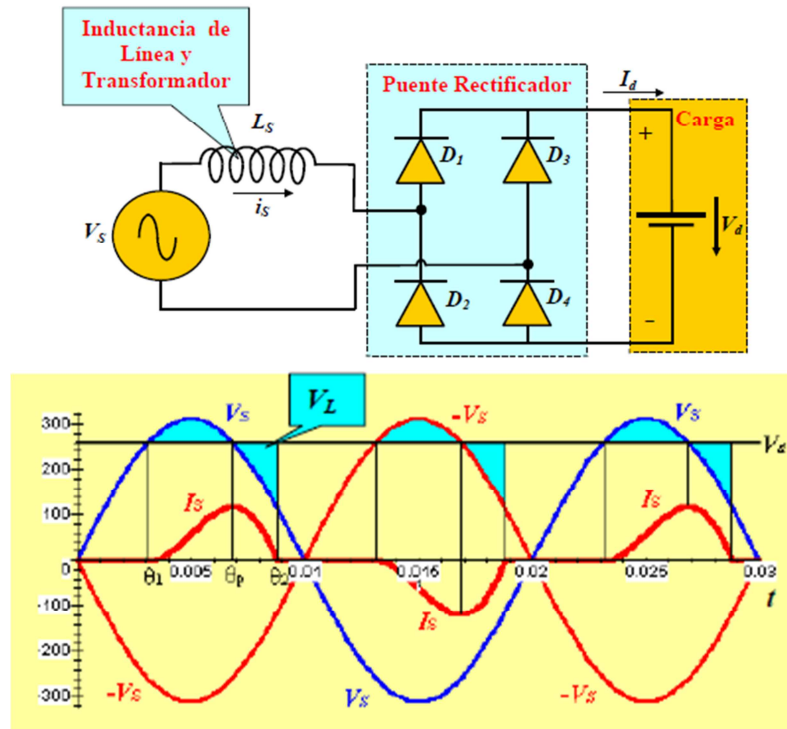
En el caso del *rectificador trifásico no controlado en puente*, el cálculo de la tensión media, V_o , es de la siguiente manera:

$$V_o = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot V_f = 1,652 \cdot V_f$$

4.2.2.3. Conmutación no instantánea de los diodos

La principal alteración en el comportamiento habitual de este tipo de rectificación, es debida a **la presencia de la reactancia síncrona del alternador trifásico del DS – 300.**

En nuestro caso, la carga es una batería de corriente continua, luego la carga está a tensión constante. Siguiendo con el esquema del rectificador monofásico no controlado en puente, el circuito equivalente para el presente caso es:



Fuente: www.itescam.edu.mx

Figura 4.14. Conmutación no instantánea en r. monofásico no controlado en puente

Recordar la intensidad en un circuito de una bobina en serie a un generador de tensión en alterna. Partiendo de la ecuación que rige el comportamiento de una inductancia, L ,

(elemento eléctrico que produce una reactancia) como: $V_{L_s} = L_s \cdot \left(\frac{di_{L_s}}{dt} \right)$ (1)

Y resolviendo la ecuación diferencial se obtiene que: *la intensidad tiene un desfase de 90° con respecto a la señal de tensión en bornes del generador.*

Si se atiende a la anterior figura, aplicando la ley de tensiones de Kirchhoff se tiene que:

$$V_s = V_{L_s} + V_d + V_{\text{Puente_Diodos}}$$

En estado ONN, la tensión en cada par de diodos tanto en el semiciclo positivo como en el negativo, se puede aproximar a 0, luego: $V_{L_s} \cong V_s - V_d$ (2)

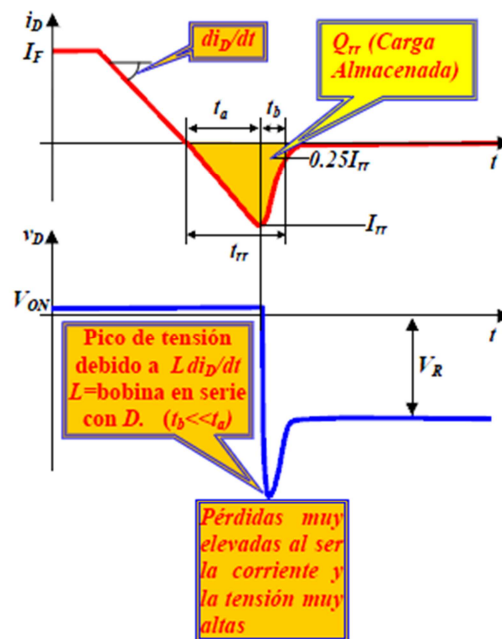
Despejando de la ecuación (1) la intensidad en la bobina, i_{L_s} , y sustituyendo la ecuación (2), se tiene la ecuación que rige el funcionamiento del circuito:

$$i_{L_s} = \frac{1}{L} \cdot \int (V_s - V_d) \cdot dt$$

Como la intensidad de la bobina es una función continua, hay un periodo de tiempo desde θ_p hasta θ_2 en el que la intensidad en la bobina, y por tanto la intensidad de salida del generador, se hace nula.

Este fenómeno es el que realiza la reactancia síncrona sobre el puente de diodos se le conoce como “**Conmutación no instantánea de los diodos**”.

Además, la corriente en la bobina decrece muy rápidamente hasta hacerse nula. Este hecho influye en la conmutación a corte del diodo, que se muestra en la siguiente figura:



Fuente: www.itescam.edu.mx

Figura 4.15. Aumento de pérdidas de carga en conmutación a corte del diodo

Esto conlleva a que la pendiente (di_D/dt) sea muy elevada, lo que produce una disminución en el tiempo de recuperación en inversa, t_{rr} . Sin embargo, se producen muchas pérdidas de carga almacenada, ya que el diodo estará sometido a altos valores de intensidad y tensión en inversa.

Este comportamiento en la rectificación del puente de diodos dará lugar a altas pérdidas de potencia eléctrica en el sistema eléctrico, así como una alta distorsión en todas las señales del circuito, pero sobre todo en la intensidad de salida (véase más información en apartado 4.7.4)

Destacar que si se conociera el valor de la reactancia síncrona del alternador, se podría calcular la pérdida de tensión y el valor medio de corriente de carga esperada.

4.2.3. Batería o acumulador

La batería o acumulador empleada en la presente instalación es de **plomo y ácido**. El fundamento teórico de cualquier tipo de batería se basa en la presencia de celdas electroquímicas. La presente batería es recargable, luego podrá permitir realizar ensayos a diferentes niveles de batería, para así completar la *Curva característica exterior de un generador*, descrita en la Figura 4.2 y 4.8.

• Impedancia interna

Cuanto menor sea este valor, mayor será el rendimiento y vida útil de la batería. Según el *modelo de Thevenin*, la impedancia interna equivalente para cada celda de energía sigue el siguiente esquema eléctrico:

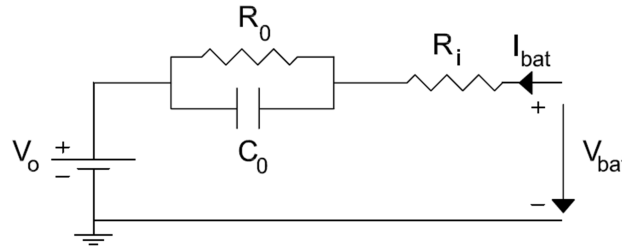


Figura 4.15. Impedancia interna batería

V_o = fuente ideal de tensión.

R_i = resistencia interna que representa las pérdidas en el electrolito y los circuitos conductores.

R_o = resistencia no lineal debido a la resistencia de contacto de las placas con el electrolito.

C_o = capacitancia de las placas paralelas.

Un modelo simplificado de la impedancia interna de una batería es una fuente ideal de tensión en serie con una resistencia. Además, la resistencia interna aproximada de la presente batería es del orden de 4 mΩ:

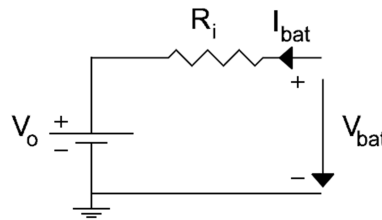


Figura 4.16. Modelo simplificado de batería

• Criterios de elección

- Capacidad de amperios – hora, Ah. Generalmente se elige una batería con capacidad nominal de entre 3 y 8 veces la energía consumida por la carga durante un ciclo de utilización.
- Eficiencia de carga.
- Autodescarga.
- Profundidad de descarga.

4.3. Cálculos justificativos

4.3.1. Variables eléctricas fundamentales: tensión, intensidad y potencia

Tensiones e intensidades

El primer paso, es calcular los valores eficaces para las magnitudes en alterna, y los valores medio para las magnitudes en continua:

$$A_m = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} a(t) dt$$

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} a(t)^2 dt}$$

En donde la variable A y a, se refieren a tensión, V, o intensidad, I.

Potencia activa: instantánea y promedio

Una vez obtenidos V e I, ya se está en condiciones de calcular la potencia a la salida del aerogenerador y la potencia de batería, a partir de su definición teórica:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (W)$$

$$\text{En monofásica: } P = \overline{p(t)} = \overline{p(t)_{batería}} \quad (W)$$

$$\text{En trifásica: } P = \overline{p(t)} = 3 \cdot \overline{p(t)_{fase}} \quad (W)$$

Para calcular la potencia de fase, hay que hacer una conversión de tensión de línea a tensión de fase, tal y como se justifica en el apartado 4.5. *Ensayos iniciales* en la secuencia de tensiones del sistema trifásico del presente aerogenerador:

$$\vec{V}_{fase} = \frac{\vec{V}_{línea}}{\sqrt{3}} \cdot (1 \cdot (\cos(30^\circ) + j \cdot \sin(30^\circ))) \quad (V)$$

Como la intensidad de línea y fase son iguales, la potencia trifásica queda como:

$$\text{En trifásica: } P = \overline{p(t)} = 3 \cdot \overline{V_{fase}(t) \cdot I_{línea}(t)} \quad (W)$$

Rendimiento del controlador (o rectificador)

Por último, se obtiene el rendimiento del controlador como:

$$\eta_{\text{controlador}} (\%) = \frac{P_{\text{batería}}}{P_{\text{salida}}} \times 100 = \frac{P}{P_T} \times 100 = \left(\frac{\overline{p(t)}}{3 \cdot p(t)_{\text{fase}}} \right) \times 100$$

Los nombres asignados a las variables eléctricas anteriormente descritas son los siguientes:

I_R = Intensidad de salida de la fase R

V_R = Tensión de salida equivalente a la fase R

P_{salida} = Potencia de salida y trifásica del aerogenerador

I_b = Intensidad de batería

V_b = Tensión en bornes de batería

$P_{\text{batería}}$ = Potencia de batería y monofásica

η_{cont} = Rendimiento del controlador o rectificador

El último parámetro por añadir sería el de velocidad de viento promedio, v , correspondiente a una frecuencia de ventiladores en cada uno de los escenarios propuestos. Esta velocidad será la *velocidad de viento promedio recibida por el área de barrido del aerogenerador*. Sólo se dará la excepción en los ensayos sin rejilla intermedia, en los que sólo se ha medido el perfil izquierdo de velocidades.

Ensayos con rejilla intermedia/sin rejilla intermedia/con tobera reductora							
Nivel del controlador: Batería media/completa							
v (m/s)	I_R (A)	V_R (V)	P_{salida} (W)	I_b (A)	V_b (V)	$P_{\text{batería}}$ (W)	η_{cont} (%)

Tabla 4.1. Formato de tabla para análisis eléctrico inicial

4.3.2. Comparativa con análisis por serie trigonométrica de Fourier

Uno de los objetivos de realizar el análisis eléctrico mediante la serie trigonométrica de Fourier es comparar estos resultados con los generados con el análisis anterior.

Otro propósito es comparar la distorsión entre circuito inicial y circuito con Filtro Pasa – Bajo (véase apartado “4.6. Ensayos sin rejilla”).

En la siguiente página, aparece el formato de tabla para la comparación entre el análisis eléctrico anterior, y el análisis por serie trigonométrica de Fourier:

Ensayo sin rejilla intermedia en circuito inicial/con filtro pasa – bajo					
Nivel del controlador : Batería media / / / $f_{\text{ventiladores}} = \text{Hz} \Rightarrow v_{\text{promedio}} = \text{m/s}$					
Análisis eléctrico por series de Fourier			Análisis eléctrico por el término de continua según Fourier		
$I_{\text{salida}} = I_{\text{sal}} = I_R$ (A)	$V_{\text{salida}} = V_{\text{sal}} = V_R$ (V)	Potencias _{salida} (W, VAR, VA)	$I_{\text{batería}} = I_{\text{bat}}$ (A)	$V_{\text{salida}} = V_{\text{bat}}$ (V)	Potencia _{batería} (W)
$f_1 = \text{Hz}$ THD = %	$f_1 = \text{Hz}$ THD = %	Potencia Activa: $P_{\text{trif}} = W$ Potencia Activa Media: $P_m = W$	$I_{\text{batería}} = A$	$V_{\text{batería}} = A$	A partir de los valores de continua obtenidos por <i>Fourier</i> :
$I_{R_media} = A$ $I_{R_eficaz} = A$ $I_{R_max} = A$ FF = FP =	$V_{R_media} = V$ $V_{R_eficaz} = V$ $V_{R_max} = V$ FF = FP =	Potencia Reactiva: $Q_{\text{trif}} = \text{VAR}$ $Q_{1^\circ \text{Armon}} = \text{VAR}$ $Q_{\text{Armon } 2^\circ-12^\circ} = \text{VAR}$ Potencia Aparente: $S_{\text{trif}} = \text{VA}$ Desfase $\phi = ^\circ$, fp =	$f_{\text{Armónico Máx}} = \text{Hz}$ $I_{\text{Armónico Máx}} = A$ $\phi_{\text{Armónico Máx}} = ^\circ$ $\left(\frac{I_{\text{Armónico Máx}}}{I_{\text{batería}}}\right) \cdot 100 = \%$	$f_{\text{Armónico Máx}} = \text{Hz}$ $V_{\text{Armónico Máx}} = V$ $\phi_{\text{Armónico Máx}} = ^\circ$ $\left(\frac{V_{\text{Armónico Máx}}}{V_{\text{batería}}}\right) \cdot 100 = \%$	
Cálculo de la potencia activa promedio			Cálculo de la potencia activa promedio		
$P_T = \overline{3 \cdot p(t)}_{\text{fase}} = W$		$\Delta P(\%) = \%$	$P = \overline{p(t)} = W$		$\Delta P(\%) = \%$
Rendimiento del controlador					
$\eta_{\text{controlador}}(\%) = \frac{P_{\text{batería}}}{P_{\text{salida}}} \times 100 = \frac{P}{P_T} \times 100 = \left(\frac{\overline{p(t)}}{3 \cdot \overline{p(t)}_{\text{fase}}}\right) \times 100 \Rightarrow \eta_{\text{controlador}} = \%$					

Tabla 4.2. Formato de tabla para análisis eléctrico por serie trigonométrica de Fourier

4.3.2.1. Cálculos relacionados con valores a la salida del alternador trifásico

1. Cálculo de la serie exponencial de Fourier

A partir de la serie trigonométrica de Fourier en función de los coeficientes armónicos A_n y B_n :

$$f(\omega t) = A_0 + A_1 \cdot \cos(\omega t) + \dots + A_n \cdot \cos(n\omega t) + B_1 \cdot \text{sen}(\omega t) + \dots + B_n \cdot \text{sen}(n\omega t)$$

Como se pretende transformar la serie trigonométrica de Fourier anterior en una serie exponencial de Fourier, se utiliza la “Fórmula de Euler”:

$$\cos(\omega t) = \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2}; \quad \text{sen}(\omega t) = \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j}$$

Por lo tanto:

$$f(\omega t) = A_0 + \left[\frac{A_1}{2} + \frac{B_1}{2j} \right] \cdot e^{j\omega t} + \left[\frac{A_1}{2} - \frac{B_1}{2j} \right] \cdot e^{-j\omega t} + \dots + \left[\frac{A_n}{2} + \frac{B_n}{2j} \right] \cdot e^{jn\omega t} + \left[\frac{A_n}{2} - \frac{B_n}{2j} \right] \cdot e^{-jn\omega t}$$

Entonces llamamos a los coeficientes C_n y C_{-n} :

$$C_n = \left[\frac{A_n}{2} + \frac{B_n}{2j} \right]; \quad C_{-n} = \left[\frac{A_n}{2} - \frac{B_n}{2j} \right]$$

Así, se obtiene la serie exponencial de Fourier

$$f(\omega t) = A_0 + C_1 \cdot e^{j\omega t} + C_{-1} \cdot e^{-j\omega t} + C_2 \cdot e^{j2\omega t} + C_{-2} \cdot e^{-j2\omega t} + \dots + C_n \cdot e^{jn\omega t} + C_{-n} \cdot e^{-jn\omega t}$$

$$f(\omega t) = A_0 + C_n \cdot e^{jn\omega t} + C_{-n} \cdot e^{-jn\omega t}$$

Ésta es la serie de Fourier que utiliza Matlab mediante el comando *fft*: ‘Fast Fourier Transform’, ‘FFT’, traducido como Transformada Rápida de Fourier.

Sin embargo, Matlab utiliza una expresión aún más reducida de la Transformada Rápida de Fourier. Para llegar a su deducción, hay que aplicar lo siguiente:

$$e^{jn\omega t} = \cos(n\omega t) + j\text{sen}(n\omega t); \quad e^{-jn\omega t} = \cos(n\omega t) - j\text{sen}(n\omega t)$$

Sustituyendo en la expresión de la serie exponencial de Fourier, se tiene la forma exacta de la expresión que devuelve Matlab para calcular los términos de amplitud y desfase:

$$f(\omega t)_{\text{Matlab}} = A_0 + 2 \cdot C_n \cdot \cos(n\omega t) = A_0 + C_{n_Matlab} \cdot \cos(n\omega t)$$

2. Parámetros de caracterización de tensión e intensidad: valor eficaz y parámetros de distorsión

Valor eficaz

Valor eficaz de la señal muestreada, obtenido a partir del análisis de Fourier. Por ejemplo, para los valores de tensión:

$$V_n = \frac{V_{Fourier}}{\sqrt{2}} \quad (n \geq 1)$$

En donde $V_{Fourier}$ es el valor de pico obtenido en el vector ‘*amplitud*’, y n es el número de armónico. Si V_m , es el término de tensión media o continua de Fourier, la tensión eficaz resultante es:

$$V_{RMS} = \sqrt{V_m^2 + \sum_{n=1}^{12} V_n^2}$$

De forma análoga se calcularía la intensidad eficaz.

Parámetros de distorsión

$$\text{Factor de Forma: } FF = \frac{ValorRMS}{ValorMedio}$$

$$\text{Factor de Pico: } FP = \frac{ValorMax}{ValorRMS}$$

‘Total Harmonic Distorsion’, THD: Mide el alejamiento del conjunto de la onda respecto a su fundamental. Por ejemplo, para los valores de tensión:

$$D_n = \frac{V_n}{V_1} \quad (n = 2, 3, \dots, 12)$$

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{12} D_n^2} \Rightarrow THD(\%) = 100 \cdot \sqrt{\sum_{n=2}^{12} D_n^2}$$

Durante todo el análisis de Fourier, se considerará hasta el 12º armónico.

3. Desfase V – I. Cálculo de potencias

Vector que contiene todos los **valores de desfase φ (º)** de potencia de los términos de la serie de Fourier seleccionados:

$$\varphi = \varphi_V - \varphi_I \text{ (º)}$$

Potencia activa a la salida mediante serie de Fourier:

$$P_{trif_Fourier} = P_T = 3 \cdot (V_m \cdot I_m + V_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1) + \dots + V_{12} \cdot I_{12} \cdot \cos(\varphi_{12})) (W)$$

Potencia activa media a la salida mediante serie de Fourier:

$$P_{m_Fourier} = P_T = 3 \cdot (V_m \cdot I_m) (W)$$

Potencia reactiva a la salida mediante serie de Fourier:

$$Q_{trif_Fourier} = Q_T = 3 \cdot (V_m \cdot I_m + V_1 \cdot I_1 \cdot \sin(\varphi_1) + \dots + V_{12} \cdot I_{12} \cdot \sin(\varphi_{12})) (VAR)$$

Potencia aparente a la salida mediante serie de Fourier:

$$S_{trif_Fourier} = S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} (VA)$$

Factor de potencia: $fdp = \cos\left(a \tan\left(\frac{Q_T}{P_T}\right)\right)$

Ángulo de desfase de potencia en el triángulo de potencias obtenido:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{Q_T}{P_T}\right) (^{\circ})$$

Para cuantificar el error al aplicar la serie trigonométrica de Fourier, se puede **contrastar el valor obtenido de potencia activa por Fourier con el valor de potencia activa promedio**:

$$\Delta P(\%) = \left(\frac{P_{Fourier} - P_{definición}}{P_{definición}} \right) \cdot 100$$

$$P_{Fourier} = P_T = 3 \cdot (V_m \cdot I_m + V_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1) + \dots + V_{12} \cdot I_{12} \cdot \cos(\varphi_{12})) (W)$$

$$P_{definición} = \overline{p(t)} = 3 \cdot \overline{p(t)_{fase}} (W)$$

4.3.2.2. Cálculos asociados a valores de batería

En este caso, al tratarse de valores de tensión e intensidad continua, en el análisis por serie exponencial de Fourier sólo se necesitan los datos asociados al término medio ($f = 0$ Hz), pero también los correspondientes al armónico máximo: amplitud, desfase y frecuencia.

De esta forma, se da información de la distorsión que hay en los valores de tensión e intensidad ya rectificadas a continua. Es algo parecido al parámetro THD utilizado en los valores de tensión e intensidad a la salida del alternador.

Destacar que hay que seleccionar adecuadamente el armónico máximo que se va a considerar en el cálculo. Para ello es necesario utilizar la gráfica de salida del ‘*Diagrama espectral de amplitud*’ y fijar la siguiente condición:

Elegir como armónico máximo un término con frecuencia mayor o igual a 100 Hz.

4.4. Planificación de los ensayos

4.4.1. Condiciones de ensayos

Tras haber descrito los equipos de medida empleados para medir las variables eléctricas en el Capítulo 2, se describen las condiciones de ensayos eléctricos.

Para realizar un análisis de las variables eléctricas (principalmente tensión, intensidad y potencia) las condiciones de ensayo son principalmente tres:

- 1) Elementos de homogeneización de viento.**
- 2) Carga del regulador.**
- 3) Frecuencia de ventiladores.**

1) Elementos de regulación de viento

Tal y como afectaba a los ensayos descritos en el Capítulo 3, los elementos de homogeneización de viento también influyen en los resultados de las variables eléctricas:

- c) Ensayos con panel de rejilla intermedio.
- d) Ensayos sin panel de rejilla intermedio.
- e) Ensayos con tobera reductora

2) Carga del regulador de potencia eólica

Será necesario fijar un nivel de carga de batería, que en nuestras medidas será a partir de batería media. *Ya que en el caso de carga de batería baja, se ha comprobado que no hay suficiente nivel de tensión para que el aerogenerador genere potencia eléctrica.*

Así, en el display del regulador se muestran los niveles de batería: led marrón y led verde, correspondiente respectivamente a nivel medio y completo de carga de batería:

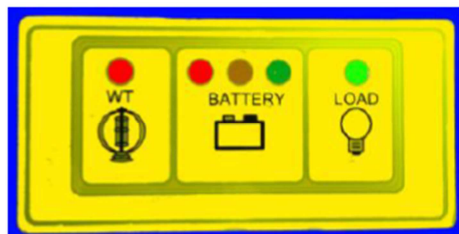


Figura 4.17. Display del regulador

3) Frecuencia de ventiladores

La frecuencia de la f.e.m. de los 4 ventiladores instalados será la que modifique la velocidad del viento recibida por el aerogenerador. Así, mediante el análisis del perfil del viento, se relaciona una frecuencia de ventiladores con una media de los valores de velocidad de viento tomados por los anemómetros. Estos valores dependerán de:

Frecuencia (Hz)	13	15	20	25	30	35	40	45	50
$v_{promedio}$ (m/s)									

Tabla 4.3. Frecuencia de ventiladores y velocidad promedio del aire

4.4.2. Parámetros de configuración en *Data Logger*

Para guardar sólo los datos de tensión e intensidad en bornes de batería se utiliza la configuración "*Medidas eléctricas*", guardada en la base de datos del software *Agilent BenchLink Data Logger*. Los parámetros principales de ensayo de esta configuración son los siguientes:

- Tiempo de ensayo: 30 s.
- Intervalo de tiempo entre cada muestra: 500 ms
- Número total de muestras: 60 muestras

De esta forma, se obtiene un total de 60 muestras, siendo un número suficiente de muestras para poder realizar un tratamiento estadístico de datos.

4.4.3. Guardar datos de osciloscopio

Para almacenar los datos de intensidad y tensión en un fichero accesible por MATLAB, se ha empleado el osciloscopio digital descrito anteriormente. Antes de almacenar estos datos, hay que elegir adecuadamente el tiempo de muestreo ($t_{muestreo}$) y el periodo de muestreo ($T_{muestreo}$).

Estos parámetros dependen del número de puntos (valores de intensidad y/o tensión) que se quieran guardar. Este osciloscopio da la opción de guardar 500 puntos o 25.000 puntos. Como las señales almacenadas no son de elevada frecuencia, es suficiente con almacenar 500 puntos. Así, sólo queda por elegir el $t_{muestreo}$ y el $T_{muestreo}$, afectadas también por el intervalo de T/div elegido en el osciloscopio:

Longitud de memoria = 500 puntos		
T/div	T _{muestreo} (s)	t _{muestreo} (s)
500 μ S	2×10^{-5}	0,01
10 ms	4×10^{-4}	0,2
25 ms	1×10^{-3}	0,5
50 ms	2×10^{-3}	1

Tabla 4.4. Selección de parámetros de muestreo I

Al observar las señales de tensión e intensidad, se concluye que la máxima frecuencia obtenida en está en torno a 500 Hz.

Entonces, se aplica el ‘Teorema del Muestreo’ o ‘Teorema de Nyquist – Shannon’, en el que se afirma que si la frecuencia de muestreo (f_{muestreo}) es mayor o igual a dos veces la frecuencia máxima de la señal analógica muestreada, no hay pérdida de información en dicha señal analógica.

Así, se justifica que la $f_{\text{muestreo}} \geq 1\text{kHz}$. Luego $T_{\text{muestreo}} \leq 1\text{ ms}$.

Como interesa almacenar los máximos datos posibles, hay que seleccionar el máximo tiempo de muestreo que cumpla el ‘Teorema de Nyquist – Shannon’. Así, los parámetros de muestreo utilizados en el osciloscopio son los siguientes:

Longitud de memoria = 500 puntos			
T/div	T _{muestreo}	f _{muestreo}	t _{muestreo}
25 ms	1 ms	1 kHz	0,5 s

Tabla 4.5. Selección de parámetros de muestreo II

El siguiente paso en el almacenamiento de muestras para realizar el Análisis de Fourier, es interpretar los datos de los ficheros de salida del osciloscopio digital.

Los datos se recogen en ficheros de extensión *CSV. Aquí no aparecen las magnitudes directas de tensión o intensidad medidas en los canales del osciloscopio. Lo que se muestran son datos entre un rango de [-100, 100] unidades. El sistema de adquisición de datos del osciloscopio interpreta cada V/div y cada I/div como 25 unidades. Así, habrá que hacer la correspondiente conversión de estas unidades, a magnitudes reales de tensión e intensidad, que dependerán de:

Tensión: V/div y escala de la sonda diferencial de tensión. Ésta última será:

$$V_{\text{real}} = V_{\text{osciloscopio}} \cdot 20.$$

Intensidad: I/div y escala de la pinza amperimétrica. Ésta última será:

$$I_{\text{real}} = 100\text{mA } I_{\text{osciloscopio}} / 1 \text{ A } I_{\text{real}}.$$

4.5. Ensayos iniciales

4.5.1. Comparativa de medidas de los equipos

El primer ensayo consiste en comprobar la bondad de las medidas eléctricas obtenidas con cada uno de los equipos. Para ello, se comparan dichas medidas.

Por ejemplo, en un ensayo sin rejilla intermedia, batería media y frecuencia de f.e.m. de ventiladores de 40 y 50 Hz, se obtienen las siguientes medidas:

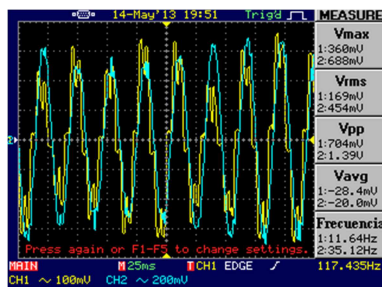
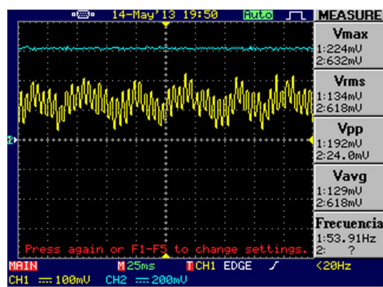
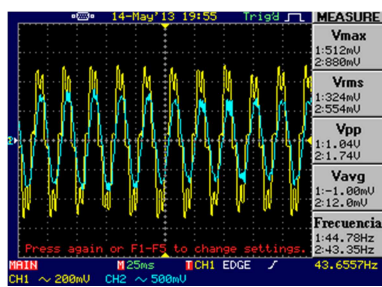
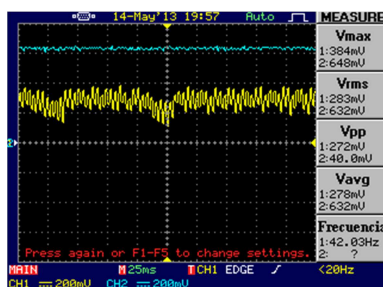
Osciloscopio					Multímetro: I_{bat} (A)			SCADA	
I_{sal} (A)	V_{sal} (V)	I_{bat} (A)	V_{bat} (V)	Max	Min	Med	I_{bat} (A)	V_{bat} (V)	
1,69	9,08	1,34	12,36	1,58	0,82	1,22	1,16	12,57	
40 Hz									
	I_{sal} (A)	V_{sal} (V)	I_{bat} (A)	V_{bat} (V)	Max	Min	Med	I_{bat} (A)	V_{bat} (V)
3,24	11,08	2,83	12,64	2,95	2,11	2,73	2,65	12,72	
50 Hz									
	I_{sal} (A)	V_{sal} (V)	I_{bat} (A)	V_{bat} (V)	Max	Min	Med	I_{bat} (A)	V_{bat} (V)

Tabla 4.6. Comparación de las medidas de los distintos equipos

Conclusiones:

- El valor de intensidad de batería obtenido por el SCADA y el obtenido por el multímetro son muy próximos entre sí.
- Hay una pequeña diferencia entre la medida de I_{bat} determinada por el SCADA y la determinada por el osciloscopio mediante la opción de promediado, pudiendo ser ésta mayor o menor que la anterior.
- Para certificar la bondad de la medida de los valores de alterna del osciloscopio hay que aplicar los cálculos empleados en el apartado “4.3. Cálculos justificativos”.

4.5.2. Secuencia de fases del sistema trifásico

Para identificar la secuencia trifásica del presente aerogenerador, se va a comprobar el desfase entre cada una de las tensiones compuestas que caracterizan un sistema trifásico: V_{RS} , V_{TR} y V_{ST} .

El esquema eléctrico se correspondería con el mostrado en la Figura 1. Mientras que las condiciones de ensayo son: sin rejilla intermedia, batería media, y frecuencia de f.e.m. de ventiladores igual a 40 Hz.

Entonces, se miden las siguientes tensiones compuestas: V_{RS} y V_{TR} ; V_{ST} y V_{TR} ; y por último, V_{RS} y V_{ST} . Las gráficas obtenidas en Matlab son las siguientes:

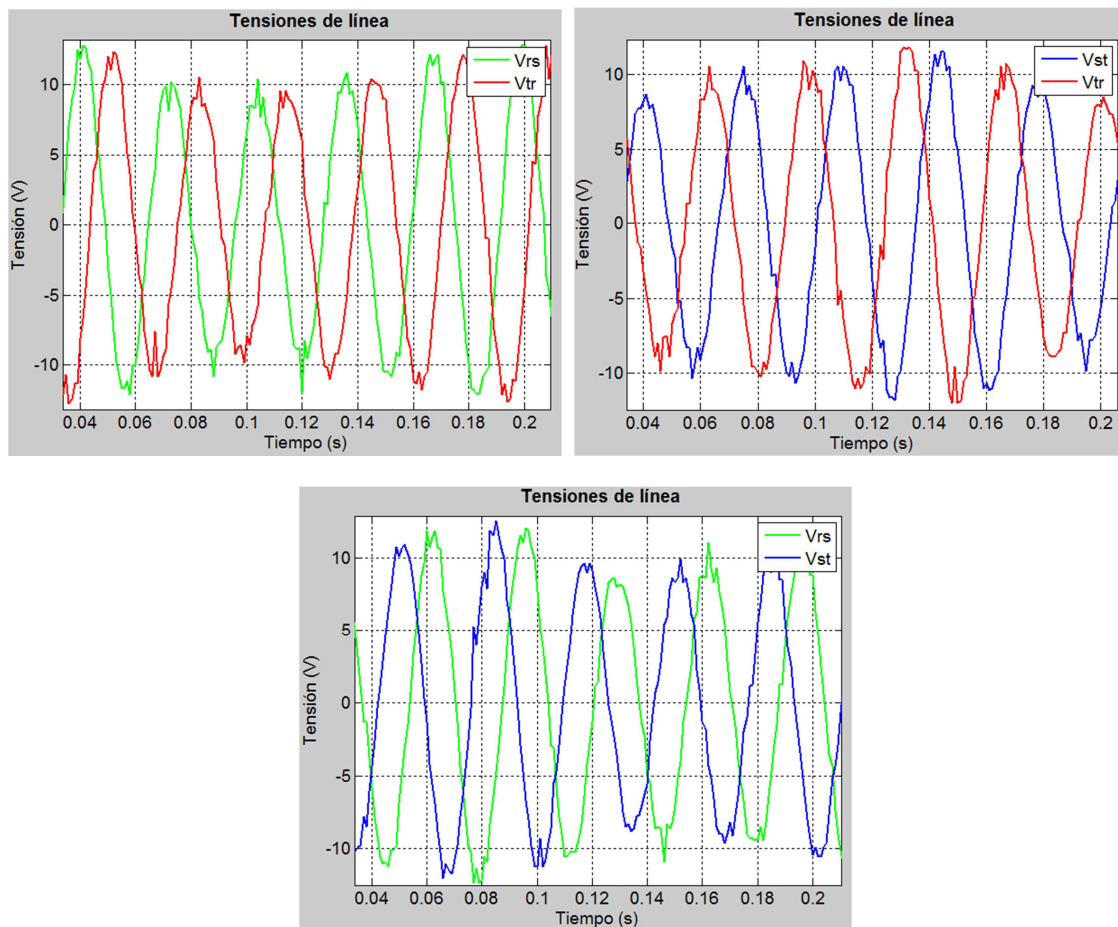


Figura 4.18. Secuencia de fases de sistema trifásico

Así, los desfases obtenidos en cada uno de los ensayos anteriores son de aproximadamente 10 ms. Como la frecuencia fundamental de todas las anteriores señales se encuentra en torno a 30 Hz, se cumple que el desfase entre tensiones compuestas es de aproximadamente 120° . Además, el desfase entre estas tres tensiones es el siguiente:

V_{TR} está adelantada $\approx 120^\circ$ con respecto a V_{ST} .

V_{RS} está adelantada $\approx 120^\circ$ con respecto a V_{TR} .

V_{ST} está adelantada $\approx 120^\circ$ con respecto a V_{RS} .

Por lo tanto, si se considera como el **origen de fases la tensión de fase V_R** , el sistema trifásico atiende a una **secuencia inversa de tensiones**. Además, si se considera el origen de fases en la fase R, el diagrama fasorial de tensiones es el siguiente:

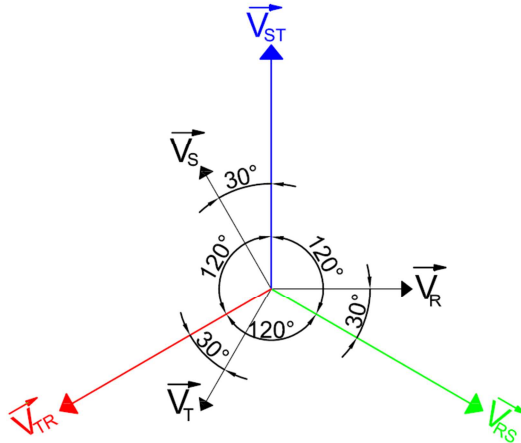


Figura 4.19. Diagrama fasorial de tensiones en secuencia inversa

Al ser el sistema trifásico de secuencia inversa, **la tensión de línea está retrasada 30° con respecto a la tensión de fase**.

Por lo tanto, habrá que tener en cuenta en todos los ensayos que en la transformación de tensión compuesta, V_{RS} , a tensión de fase, V_R , hay que multiplicar por un fasor unitario con ángulo de 30° :

$$\vec{V}_R = \frac{\vec{V}_{RS}}{\sqrt{3}} \cdot (1 \cdot (\cos(30^\circ) + j \cdot \sin(30^\circ)))$$

Así, por ejemplo, para el ensayo a frecuencia de f.e.m. de ventiladores igual a 40 Hz, y con bobina de 33 mH actuando de Filtro Pasa – Bajo (desarrollado en el apartado 4.7.), se obtiene:

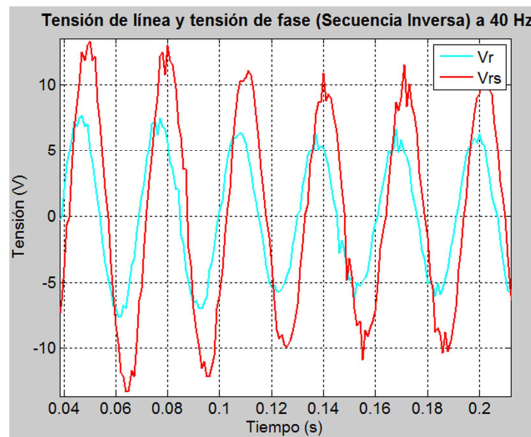


Figura 4.20. Tensión de fase y tensión de línea según secuencia inversa

4.5.3. Caracterización del rectificador trifásico

1. Conmutación no instantánea de los diodos

El primer paso para identificar que se trata de un rectificador trifásico no controlado, es comprobar que la señal de intensidad de salida tiene una forma similar a la expuesta en la 4.14, pero aplicada a una señal trifásica. Para justificar este comportamiento, se muestra la tensión e intensidad de salida, por ejemplo para el caso con rejilla intermedia, sin bobina y a velocidad de viento máxima:

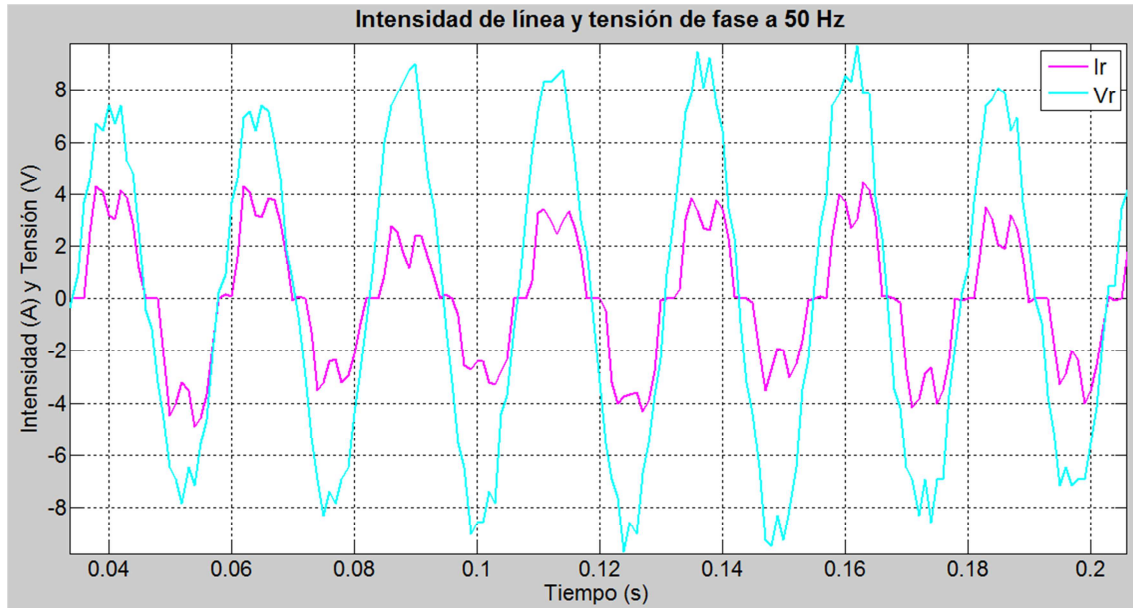


Figura 4.21. Señales de intensidad y tensión de salida a 50 Hz y con rejilla intermedia

Se observa que se obtiene la señal de intensidad de salida pronosticada en el apartado 4.1.2.3. Conmutación no instantánea de los diodos. Ver como el retardo de la conmutación ocurre en los 6 diodos que forman rectificador no controlado del presente sistema. Además, se presenta una pérdida de carga en la señal tensión, aunque menor que en la intensidad. Así, queda justificado que se trata de un rectificador trifásico no controlado.

Obsérvese como la intensidad y tensión están prácticamente en fase, propiciando un factor de potencia (fdp) cercano a la unidad como era de esperar. Este aspecto se justificará en el análisis por serie trigonométrica de Fourier en el apartado 4.7.4.

2. Tensión de salida y tensión rectificadora

El siguiente paso en la caracterización del rectificador trifásico controlado, es saber qué tipo de montaje A partir de la tensión de salida del alternador, y de la tensión de batería, se puede identificar el tipo de rectificador trifásico que dispone el controlador.

Por ejemplo, para el caso de máxima velocidad de viento en el ensayo con rejilla intermedia, y sin bobina, se obtienen las siguientes señales de tensión:

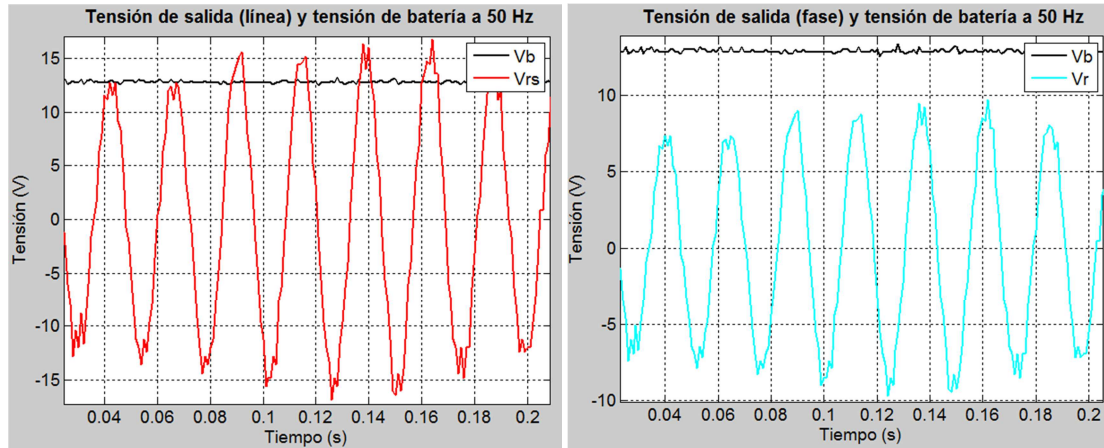


Figura 4.22. Señales de tensión a $f_{\text{ventiladores}}$ de 50 Hz, sin bobina y con rejilla intermedia

La señal a la salida del generador tiene un cierto carácter aperiódico, y por esto no se mantiene un valor de pico en V_R constante. Este valor fluctúa entre 7,39 V y 9,7 V.

Por lo tanto, si se sustituye estos valores en la ecuación que define la tensión media de salida (V_o) en un rectificador de puente trifásico, se obtiene que:

$$V_{o_{\text{MÁXIMO}}} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot V_{R_{\text{PICO_MÁXIMO}}} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot 9,70 = 16,04 \text{ V}$$

$$V_{o_{\text{MÍNIMO}}} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot V_{R_{\text{PICO_MÍNIMO}}} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot 7,39 = 12,24 \text{ V}$$

Nótese que el valor de pico máximo se repite en muy pocas ocasiones, luego el valor más representativo de pico será el mínimo: 12,24 V. Si comparamos este valor con el obtenido realmente, $V_o = 12,85 \text{ V}$, se puede afirmar que se asemeja al valor esperado por un rectificador trifásico no controlado en puente.

Además, si se compara con el resultado de un rectificador trifásico no controlado en montaje simple:

$$V_o = \frac{m}{\pi} \cdot V_M \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{3}\right) = \frac{3}{\pi} \cdot 13,44 \cdot \text{sen}\left(\frac{180^\circ}{3}\right) = 11,11 \text{ V}$$

Se observa que este resultado queda alejado del valor real obtenido: $V_o = 12,85 \text{ V}$.

Por tanto, queda justificado que la rectificación de la señal alterna a continua se realiza mediante un rectificador no controlado en puente. Es decir, comúnmente denominado **rectificador trifásico en puente de diodos.**

4.6. Ensayos con rejilla intermedia

4.6.1. Ensayos en vacío: controlador desconectado

El presente ensayo consiste en medir la tensión a la salida del alternador trifásico en vacío, a frecuencias de ventiladores. El esquema eléctrico correspondiente al equivalente monofásico es el siguiente:

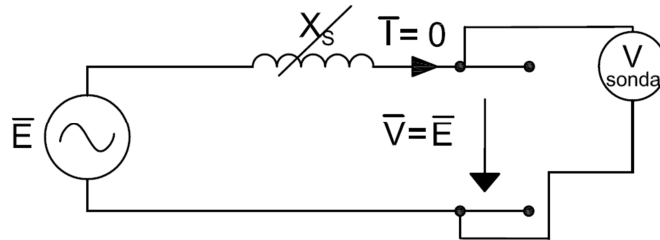


Figura 4.23. Circuito monofásico equivalente del ensayo en vacío

Se obtienen los siguientes resultados de tensiones eficaces de fase (E_R) y frecuencias fundamentales de la señal senoidal (f):

Ensayos en vacío con rejilla intermedia			
v (m/s)	n (rpm)	E_R (V)	f (Hz)
7,00	532,6	11,27	72,27
6,16	479,6	10,10	64,45
5,25	413,8	8,81	56,64
4,49	357,8	7,47	48,83
3,56	295,8	5,98	39,06
2,66	232,2	4,68	31,25
2,06	176,3	3,58	23,44

Tabla 4.7. Resultados ensayo en vacío con rejilla intermedia

Como era de esperar, **hay un aumento de la frecuencia y tensión en bornes de aerogenerador a medida que aumenta la velocidad de giro del rotor del generador, es decir, conforme aumenta la velocidad de viento.**

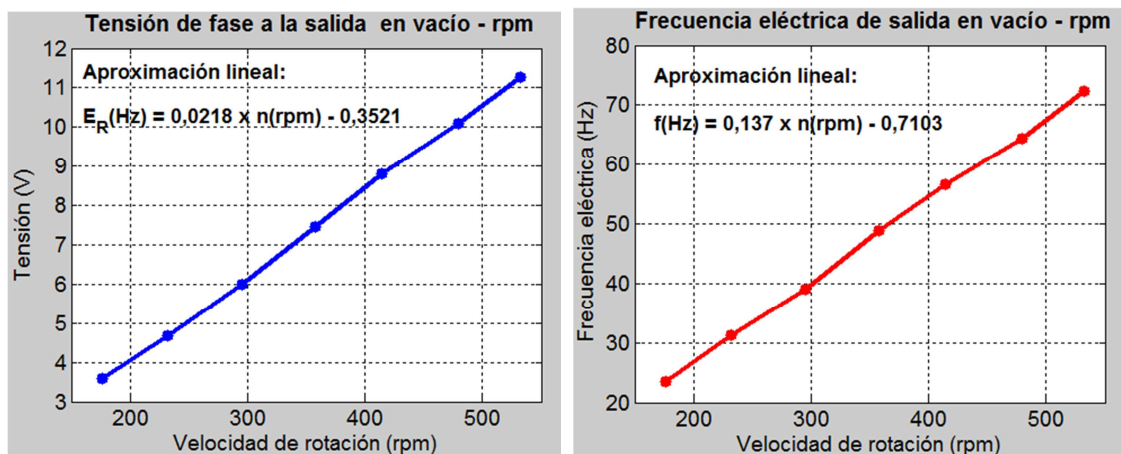


Figura 4.24. Tensión salida en vacío – rpm (izq.). Frecuencia eléctrica en vacío – rpm (dcha.)

Además, se obtiene para todas las velocidades de viento una **señal de tensión de salida con muy poca distorsión**. Por ejemplo, para el caso de máxima velocidad de viento:

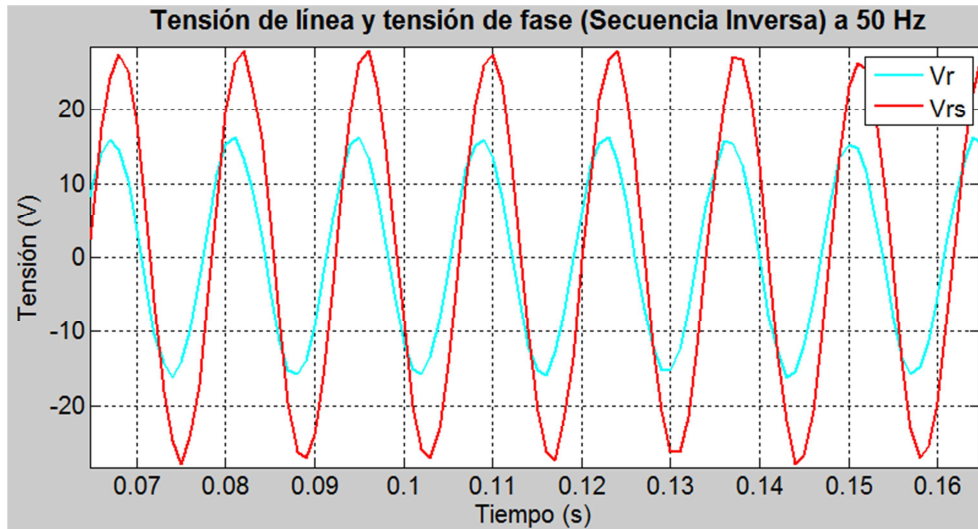


Figura 4.25. Tensión de fase y compuesta en vacío a máxima velocidad de viento

Si se compara la anterior figura con la figura 4.21, o con cualquier figura que aparezca la tensión de salida y/o de fase en circuito en carga, se observa como hay un aumento de distorsión de la señal de tensión de salida del aerogenerador cuando se conecta el circuito a una carga. En el presente proyecto la carga se refiere al controlador y a la batería.

• Cálculo del número de polos del generador

Recordar que la relación entre las r.p.m. de la máquina, n , y la frecuencia de la f.e.m., f , de la presente máquina síncrona se ha definido en el apartado 4.2.1 como:

$$f = \frac{n \cdot p}{60} \quad \text{siendo } p = \text{nº de pares de polos.}$$

Si se aplica en esta ecuación los valores de la tabla anterior, se obtiene que el **número de pares de polos del alternador trifásico es 8**, es decir, $p = 8$.

4.6.2. Ensayos en carga: controlador y batería conectados

En el presente ensayo, el esquema eléctrico es el siguiente:

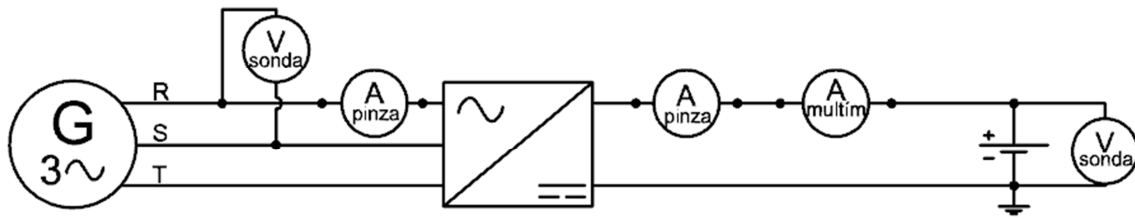


Figura 4.26. Esquema eléctrico inicial de ensayo en carga

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Ensayos con rejilla intermedia							
Nivel del controlador: Batería media							
v (m/s)	I _R (A)	V _R (V)	P _{salida} (W)	I _b (A)	V _b (V)	P _{batería} (W)	η _{cont} (%)
7,00	2,64	5,74	42,36	2,19	12,85	28,10	66,33
6,16	2,19	4,83	30,32	1,48	12,84	18,96	62,53
5,25	1,57	4,65	19,09	1,06	12,84	13,57	71,09
4,49	1,29	4,33	14,20	0,57	12,78	7,33	51,63
3,56	0,84	4,21	9,04	0,32	12,78	4,04	44,65
2,66	0,42	3,97	3,32	0,07	12,78	0,88	26,65
2,06	0,20	3,01	1,29	0,05	12,77	0,65	50,13

Tabla 4.8. Resultados ensayo con controlador conectado y con rejilla intermedia

Representemos las gráficas más importantes para el caso de velocidad de viento máxima:

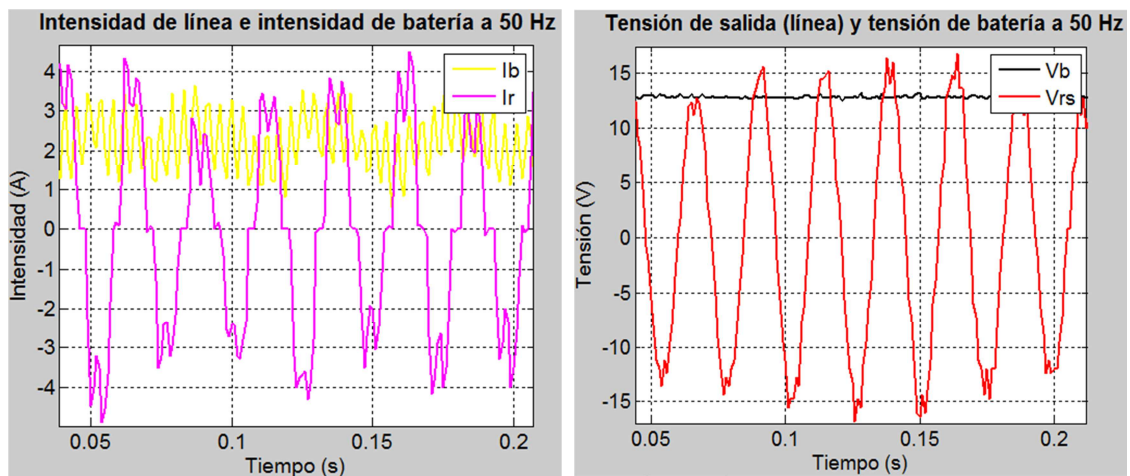


Figura 4.27. Intensidades y tensiones de entrada y salida del cont., 50 Hz y rejilla intermedia

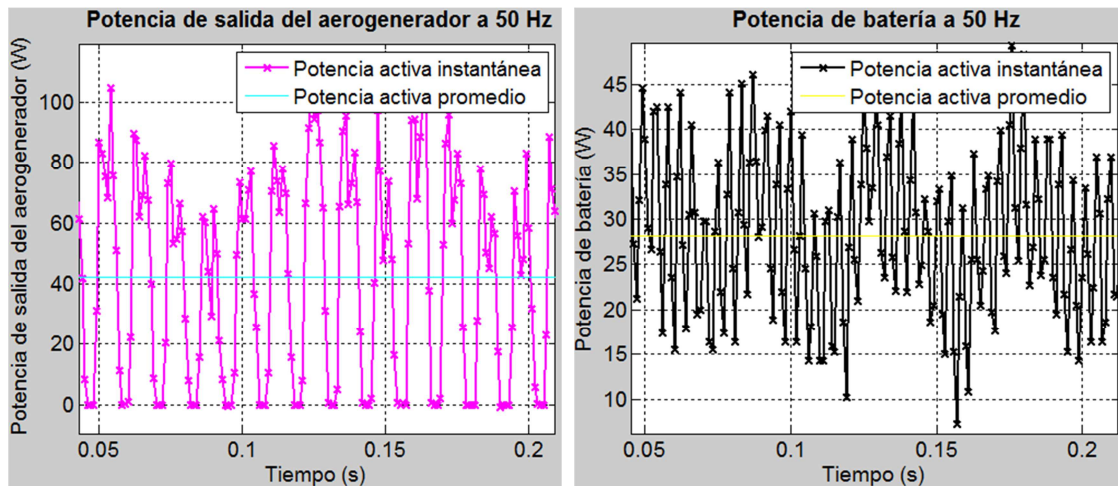


Figura 4.29. Potencia de salida y potencia de batería, 50 Hz y rejilla intermedia

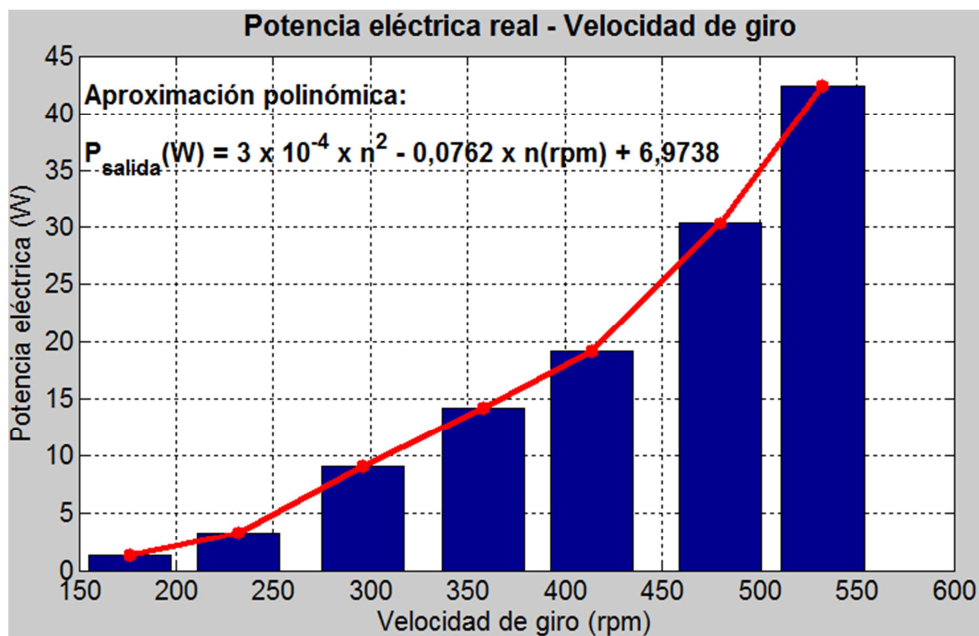


Figura 4.30. Potencia de salida – velocidad de giro con rejilla intermedia

• Curva potencia eléctrica – velocidad de viento

Una vez calculados los valores de velocidad de viento exactos que llegan al área barrida del aerogenerador, ya se está en condiciones de comparar la curva teórica de potencia – velocidad de viento, con esta misma curva real.

Para este cálculo, primero se obtienen los valores de potencia eléctrica en la curva del fabricante para estos nuevos valores de velocidad de viento. Destacar que estos valores de potencia eléctrica se refieren a potencia eléctrica a la salida del alternador trifásico. Además, se ha tenido que hacer una modificación en la graduación del eje de abscisas: eje de velocidad de viento.

Esta modificación es debido a una contradicción en la velocidad nominal dada por el fabricante de 13,5 m/s. Ya que en la gráfica inicial aparecía en 13 m/s:

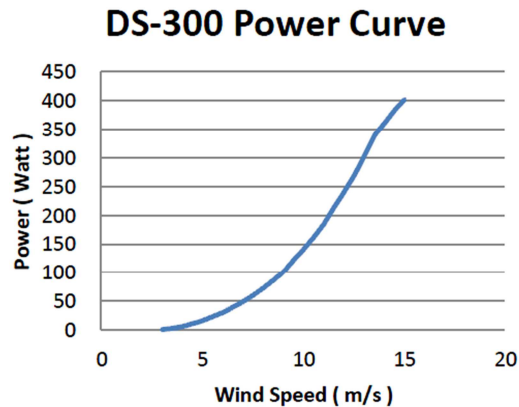


Figura 4.31. Potencia de salida – velocidad de viento teórica inicial

Por lo tanto, se adapta el eje de abscisas a los datos reales dados por el fabricante, y reglan más unidades en los ejes para obtener más precisión en los datos de potencia interpolados geoméricamente:

CON REJILLA INTERMEDIA

DS-300 Power Curve

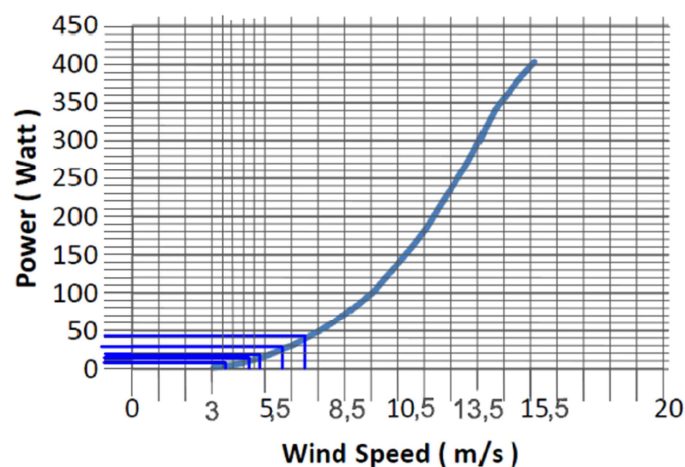


Figura 4.32. Potencia eléctrica – velocidad de viento teórica considerada en rejilla

Así, en la siguiente figura se muestra la comparativa entre al potencia eléctrica real obtenida a la salida del aerogenerador, con el mismo parámetro que garantiza el fabricante.

Véase que se obtiene un primer porcentaje del 21,83 %, mientras que a mayores velocidades de viento la similitud entre potencia eléctrica real y teórica es mayor. Destacar que esta alta variabilidad en el primer dato no es significativa, ya se trata de una potencia eléctrica real muy baja: 9,04 W

Así, se justifica que hasta velocidades de viento de 7 m/s, la potencia eléctrica a la salida que garantiza el fabricante se asemeja mucho a la obtenida en los ensayos.

Habrá que ver si para velocidades mayores se sigue cumpliendo la anterior conclusión.

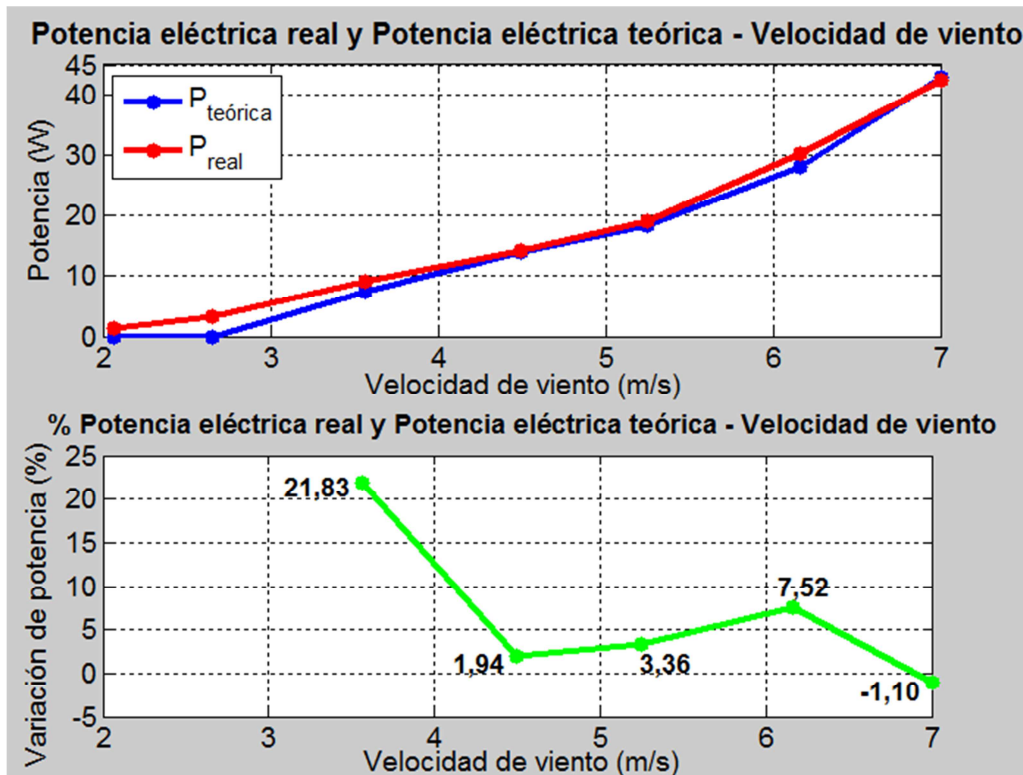


Figura 4.33. Potencia eléctrica – velocidad de viento: real y teórica. Con rejilla

• Velocidad de arranque del aerogenerador

La frecuencia de ventiladores a la que empieza a rotar el aerogenerador es de 13 Hz, sin embargo, se necesita más velocidad de viento para que empiece a cargarse el controlador. Destacar, que esta carga puede ser tanto para absorber potencia activa de la carga (batería), como para inyectar potencia activa a la carga. Así, hay que diferenciar ambos casos.

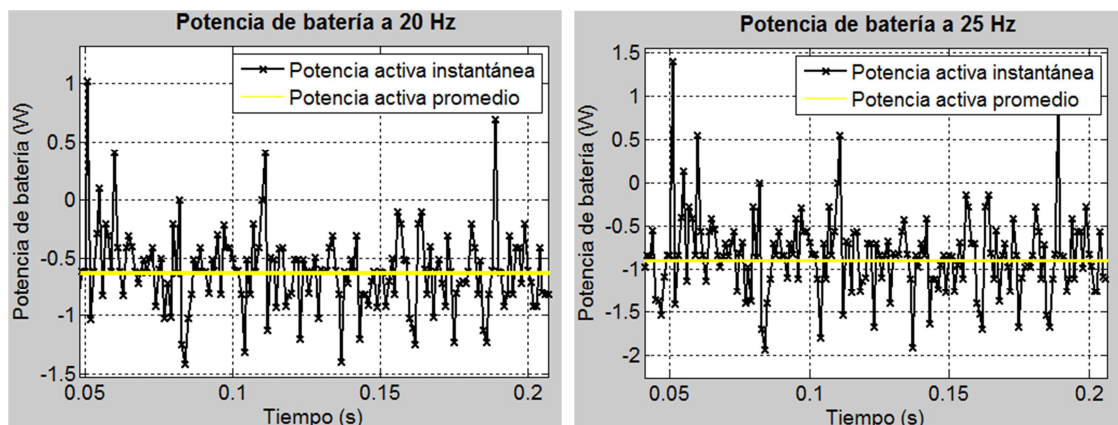


Figura 4.34. Potencia de batería a 20 (izquierda) y 25 Hz (derecha) con rejilla intermedia

En régimen de batería media, la frecuencia de ventiladores a partir de la cual cargarse el aerogenerador es de 20 Hz, equivalente a una velocidad promedio del viento de 2,06 m/s.

Así, para los casos de 20 y 25 Hz, se obtendrá una potencia activa generada por la batería (véase anterior figura). Luego es a partir de una velocidad de viento 3.56 m/s cuando comienza a inyectarse potencia eléctrica en la batería:

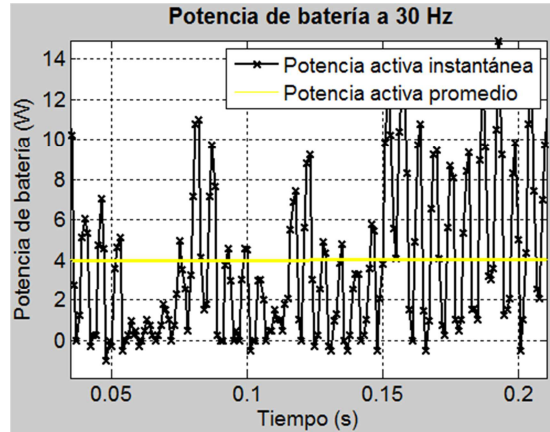


Figura 4.35. Potencia de batería a frecuencia de 30 Hz sin rejilla intermedia

4.6.3. Comparativa de resultados de ensayos en vacío y en carga. Factor de regulación

Un parámetro muy utilizado en las máquinas síncronas, es el **factor de regulación**, F_{REG} . Este variable expresa el cambio en la tensión de bornes del generador de vacío a plena carga para una determinada excitación en los polos. Es decir, para una velocidad de giro del aerogenerador, relaciona la tensión obtenida en el ensayo en vacío, E_R , con la tensión obtenida en carga, V_R . Ambos valores son referidos a la fase R, y además eficaces:

$$F_{REG} (\%) = \left(\frac{E_R - V_R}{V_R} \right) \cdot 100$$

Para el caso con rejilla intermedia, el factor de regulación atiende a la siguiente curva:

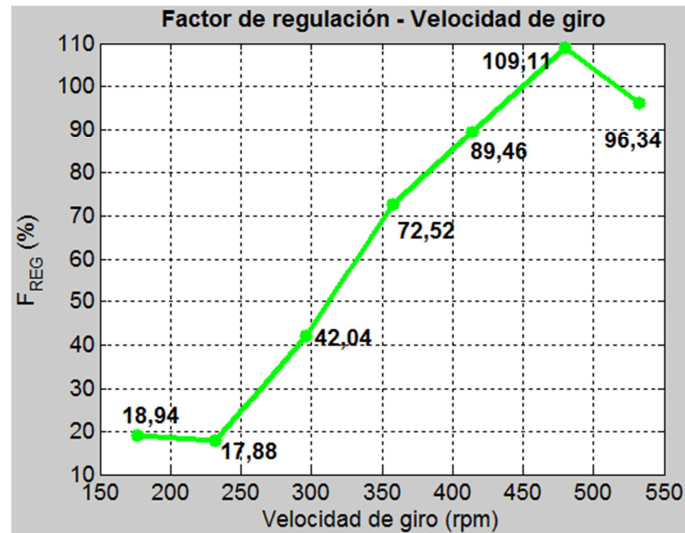


Figura 4.36. Factor de regulación – velocidad de giro. Con rejilla intermedia

Otro parámetro a comparar entre el ensayo en vacío y el ensayo en carga, es la frecuencia eléctrica de la señal de tensión. En la siguiente figura se observa que para cada velocidad de giro del aerogenerador, la frecuencia en el circuito en vacío siempre es mayor que la frecuencia en el circuito con carga:

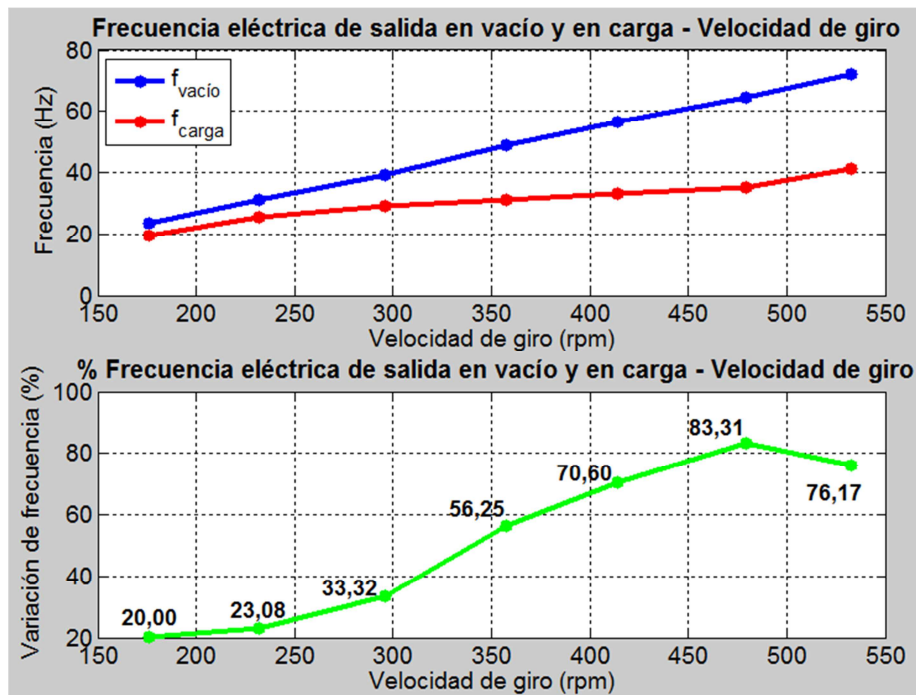


Figura 4.37. Curvas frecuencia eléctrica – velocidad de giro: en vacío y en carga. Con rejilla

4.6.4. Conclusiones de los ensayos eléctricos con rejilla intermedia

- 1) **Los valores de potencia eléctrica que genera el alternador trifásico del aerogenerador DS – 300 se aproximan a los teóricos hasta una velocidad de viento de 7 m/s.** Se obtiene una diferencia máxima del 21,08 %, que es referido a una potencia eléctrica real de 9,04 W. Para los demás ensayos se ha obtenido una variabilidad menor al 8 %.
- 2) **En los ensayos con rejilla intermedia se opera muy lejos de la potencia nominal.** La potencia de salida a máxima velocidad de viento posible, 7 m/s, es de 42,36 W. Este punto de funcionamiento está lejos del nominal: 300 W a 13,5 m/s.
- 3) **El rendimiento del rectificador real es muy inferior con respecto al garantizado por el fabricante (> 92 %).** Esta baja eficiencia del rectificador es debida a la *conmutación no instantánea de los diodos del rectificador*
- 4) **La velocidad de arranque del aerogenerador a batería media es de 3,56 m/s,** cercano al valor de 3 m/s que garantiza el fabricante.
- 5) Se obtiene una **señal de intensidad de batería con mucho ruido.** Es casi obligatorio diseñar un sistema de filtrado que disminuya esa alta distorsión, ya que la mayoría de las cargas en continua no soportarían esa gran fluctuación de la intensidad. Para ello se va a realizar un **filtro pasa – bajo** con un valor de inductancia que permita el mejor funcionamiento del aerogenerador (véase el apartado *Ensayos sin rejilla intermedia*).
- 6) **La tensión de salida del alternador tiene mayor carácter aperiódico y tiene mayor ruido que para el comportamiento de la máquina síncrona en vacío.** Este fenómeno es esperado, ya que cuando se conecta la carga se produce la *reacción del inducido*, provocando un campo magnético resultante distinto en el estátor. Así, se genera una señal eléctrica con más distorsión que la que dispone el generador en vacío. Esto no justifica la baja calidad de las señales tanto en alterna como en continua del circuito.
- 7) **Alto grado de distorsión en la señal de intensidad de salida,** provocado por la *conmutación no instantánea* de los diodos del controlador. Para cuantificar ambas distorsiones se puede calcular el THD (véase el apartado 4.7. *Ensayos sin rejilla*).
- 8) **La tensión y frecuencia eléctrica de la señal de salida disminuye cuando se conecta el alternador trifásico a una carga.** Esto es debido al fenómeno de reacción del inducido, ya descrito en el apartado 4.2.1. *Generador eléctrico*.
- 9) **Como era de esperar, el factor de regulación es siempre positivo.** Este parámetro está **directamente relacionado con el fdp de la carga.**
- 10) **El componente eléctrico que conlleva al bajo rendimiento global del sistema eléctrico** definido en la figura 4.26, es el **controlador**.

4.7. Ensayos sin rejilla intermedia

4.7.1. Resultados circuito inicial en carga

Partiendo del mismo circuito eléctrico de la Figura 4.26, se obtienen los siguientes resultados para el caso de rejilla intermedia:

Ensayos sin rejilla intermedia							
Nivel del controlador: Batería media/completa							
v (m/s)	I _R (A)	V _R (V)	P _{salida} (W)	I _b (A)	V _b (V)	P _{batería} (W)	η _{cont} (%)
8,38	2,99	5,78	46,51	2,99	12,63	37,78	81,23
7,52	2,45	5,15	35,47	1,97	12,52	24,70	69,64
6,81	1,82	4,67	24,00	1,24	12,44	15,44	64,31
6,01	1,31	4,41	15,37	0,77	12,43	9,62	62,56
5,13	1,02	4,20	11,28	0,51	12,39	6,37	56,44
4,13	0,60	3,99	4,22	0,14	12,35	1,71	40,60
3,26	0,25	3,16	1,52	0,01	12,38	0,11	7,09

Tabla 4.9. Resultados ensayos con controlador conectado y sin rejilla intermedia

De forma análoga a como se hacía en el apartado 4.6, se vuelven a representar las curvas características más importantes para el caso de máxima velocidad de viento. Se necesitan los datos de la velocidad de giro del aerogenerador para este caso, mostrada a continuación:

Velocidad de giro del aerogenerador sin rejilla intermedia							
F _{VENTILADORES} (Hz)	20	25	30	35	40	45	50
Velocidad de giro (rpm)	190,5	251,3	318,8	380,1	450,3	506,5	576,1

Tabla 4.10. Velocidad de giro del aerogenerador sin rejilla intermedia

Nótese que ambas señales de intensidad y tensión tienen la misma distorsión que en los ensayos con rejilla intermedia, produciendo así una potencia de batería muy fluctuante:

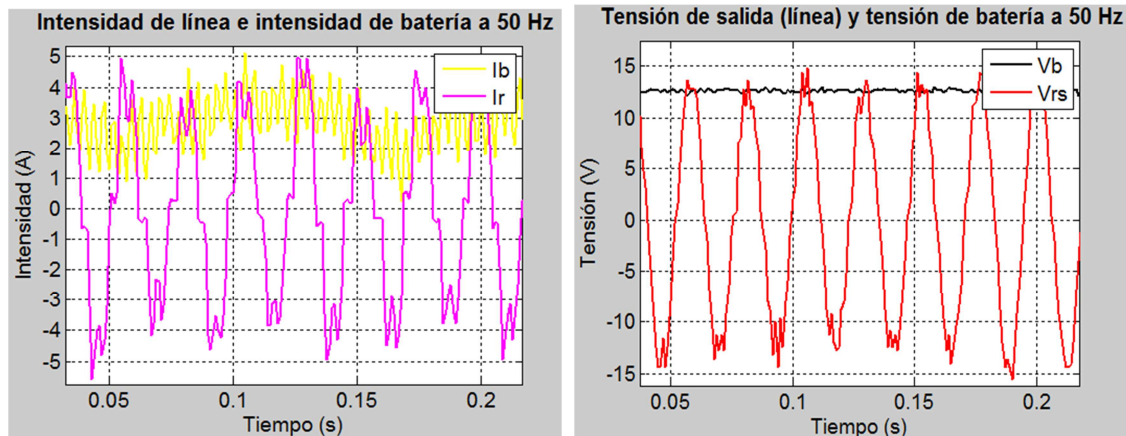


Figura 4.38. Intensidades y tensiones de entrada y salida del cont., 50 Hz y sin rejilla intermedia

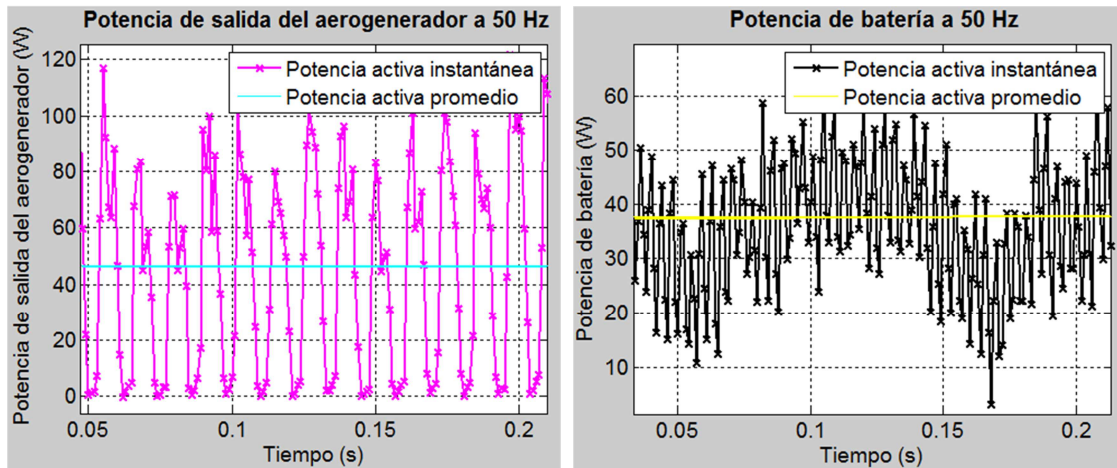


Figura 4.39. Potencia de salida y potencia de batería, 50 Hz y sin rejilla intermedia

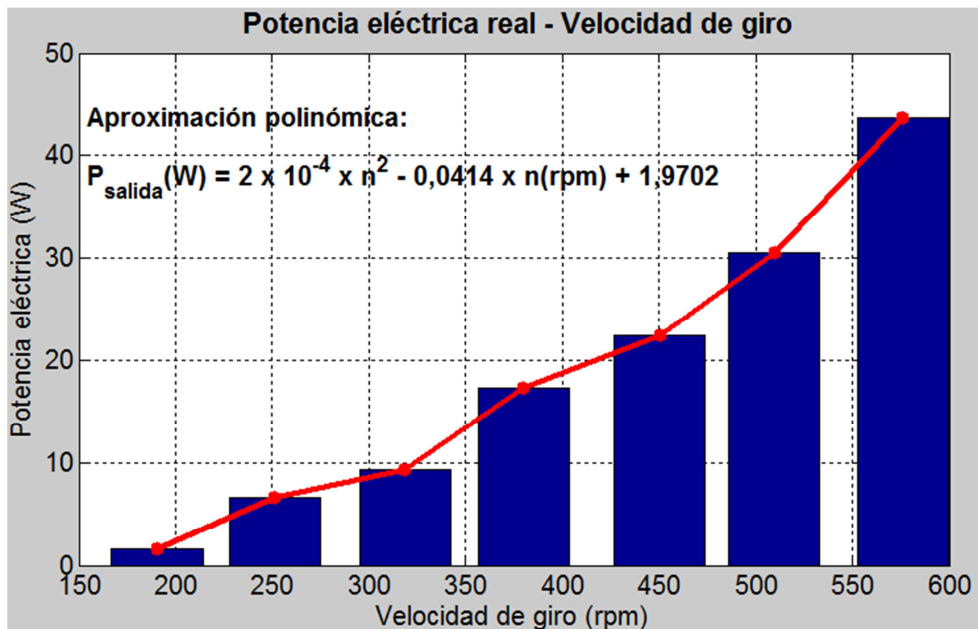


Figura 4.40. Potencia de salida – velocidad de giro sin rejilla intermedia

• Curva potencia eléctrica – velocidad de viento

En este caso, no se va a comparar la potencia eléctrica real con la teórica garantizada por el fabricante. La razón es la alta heterogeneidad de la velocidad de viento cuando se ha quitado el panel de rejilla intermedio. Además, sólo se ha calculado la velocidad de viento promedio en el perfil izquierdo. Por lo que tampoco se dispone de una velocidad proyectada en el área de barrido del aerogenerador.

• Velocidad de arranque del aerogenerador

Ahora, a diferencia del ensayo con rejilla intermedia, se empieza a generar potencia para una frecuencia de ventiladores de 25 Hz. Mientras que con rejilla intermedia se necesitaba una frecuencia de ventiladores de 30 Hz para generar potencia:

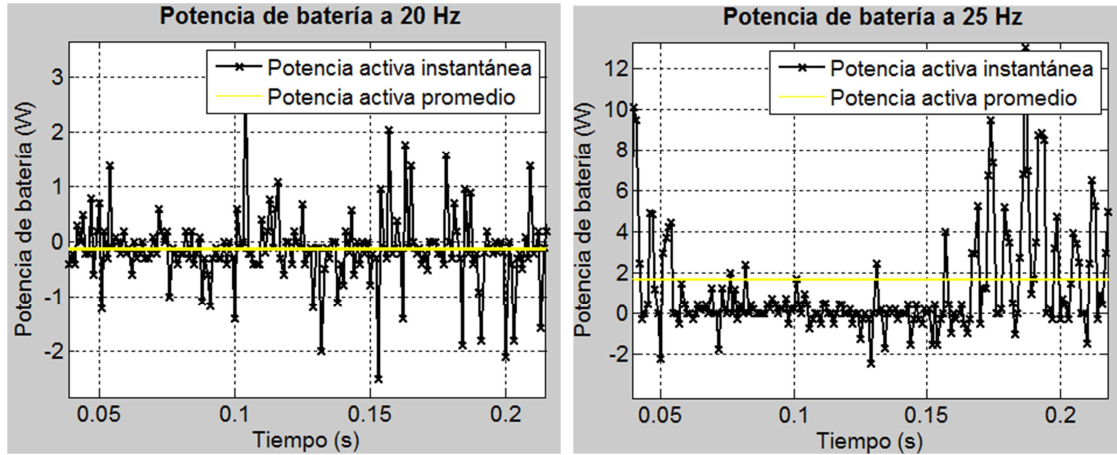


Figura 4.41. Curva potencia de batería a 20 (izquierda) y 25 Hz (derecha) sin rejilla intermedia

4.7.2. Comparativa de resultados de ensayos con y sin rejilla. Factor de regulación

De los dos tipos de ensayos realizados, sería destacable comparar los resultados de potencia de salida del aerogenerador a distintas frecuencias de la f.e.m. de los ventiladores. Se observa que no hay un aumento significativo de la potencia cuando se quita el panel de rejilla intermedia. Sólo hay un aumento del 100 % a una $f_{\text{ventiladores}}$ de 25 H, pero no es destacable porque se genera una potencia eléctrica insignificante:

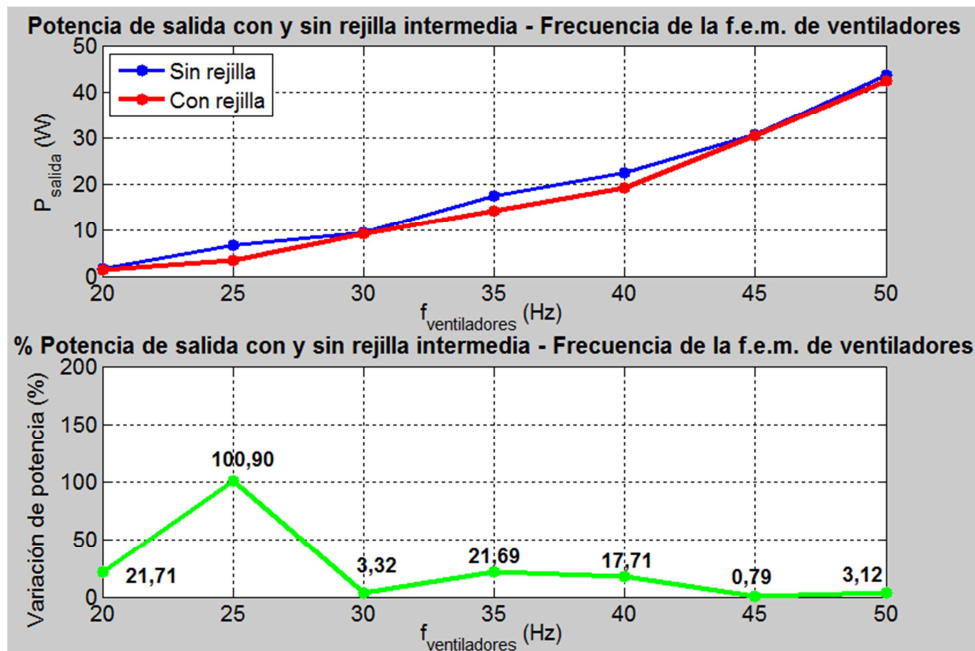


Figura 4.42. Potencia de salida – $f_{\text{ventiladores}}$: con y sin rejilla intermedia

4.7.3. Resultados con filtro pasa – bajo en carga

Para esta serie de ensayos se instala un de filtro pasa – bajo con bobina, cuyo esquema eléctrico es el siguiente:

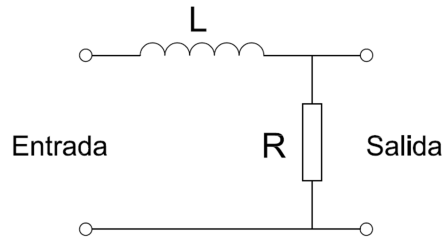


Figura 4.42. Cuadripolo filtro pasa – bajo con bobina

Así, el ancho de banda de este circuito abarcaría desde 0 Hz hasta una frecuencia de corte determinada por:

$$f_c = \frac{R}{2\pi L} ; R = \text{resistencia interna equivalente de la batería.}$$

Por lo tanto, si se añade el filtro pasa – bajo al esquema de la figura 4.26, el esquema eléctrico correspondiente pasa a ser el siguiente:

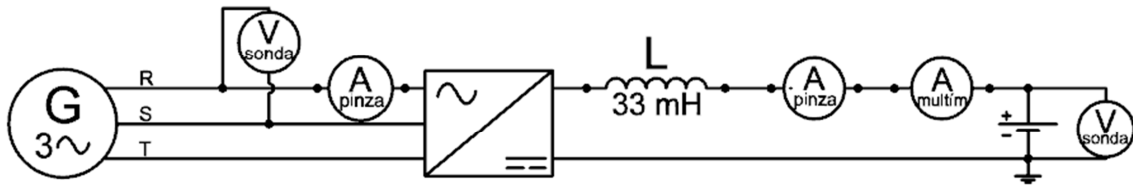


Figura 4.43. Esquema eléctrico de ensayo con filtro pasa – bajo en carga

La bobina puede tomar los valores de inductancia: [33, 78, 140, 193, 236] mH. Sin embargo, se ha elegido la bobina de 33 mH, ya que en los demás casos se activa el freno del aerogenerador para frecuencia de la f.e.m. de ventiladores menor o igual a 50 Hz.

Así, los resultados de las variables eléctricas obtenidas en este caso son las siguientes:

Ensayos sin rejilla intermedia y con filtro pasa – bajo							
Nivel del controlador: Batería media							
v (m/s)	I _R (A)	V _R (V)	P _{salida} (W)	I _b (A)	V _b (V)	P _{batería} (W)	η _{cont} (%)
8,38	2,86	5,35	43,68	2,27	12,56	28,46	65,15
7,52	2,15	5,08	30,56	1,84	12,47	22,96	75,12
6,81	1,81	4,67	22,47	1,30	12,41	16,09	71,59
6,01	1,47	4,31	17,28	0,69	12,37	8,56	49,52
5,13	0,91	4,06	9,34	0,37	12,31	4,62	49,45
4,13	0,67	3,85	6,67	0,02	12,28	0,25	3,70
3,26	0,24	3,13	1,57	0,01	12,30	0,16	10,20

Tabla 4.11. Resultados ensayos sin rejilla intermedia, con filtro pasa – bajo y en carga

De forma análoga a los anteriores ensayos, se pueden mostrar las gráficas de las variables eléctricas más significativas para velocidad de viento máxima:

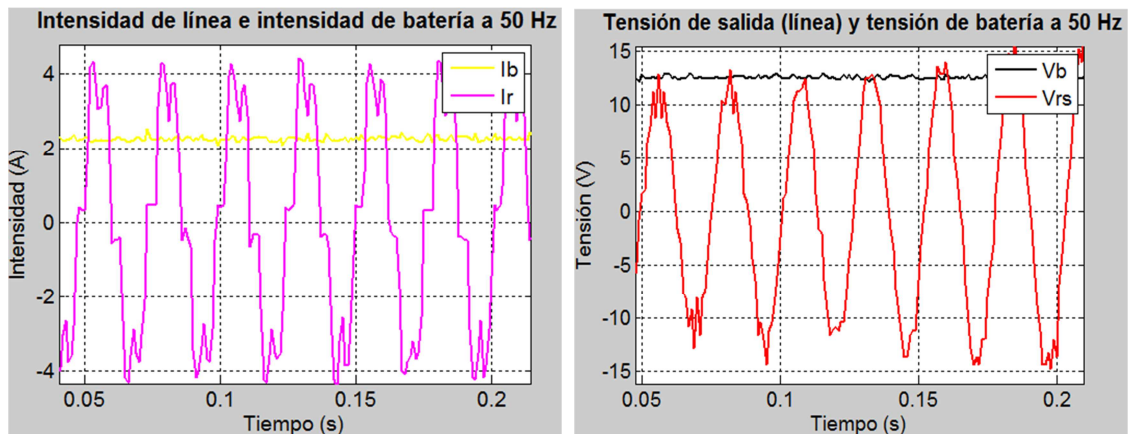


Figura 4.44. I y V de entrada y salida del cont., 50 Hz, sin rejilla intermedia y con bobina

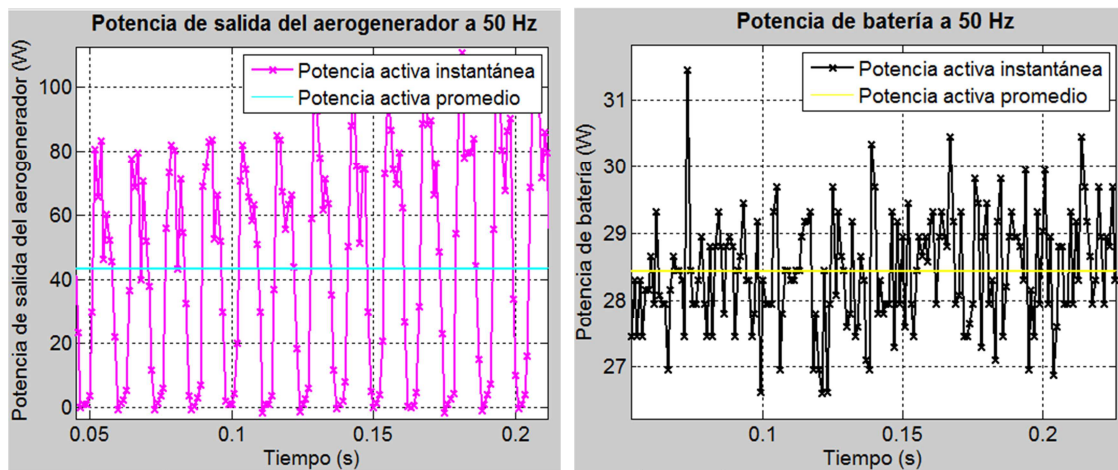


Figura 4.45. Potencia de salida y potencia de batería, 50 Hz, sin rejilla intermedia y con bobina

Se observa en la figura 4.44 (izquierda) que la señal de intensidad de batería dispone de una menor distorsión que en los casos anteriores en los que no se había instalado un filtro pasa – bajo. Véase el siguiente apartado para analizar más diferencias en el comportamiento del sistema eléctrico con y sin bobina.

4.7.4. Comparativa de resultados de ensayos con y sin filtro pasa – bajo

Para realizar esta comparativa se utiliza el análisis trigonométrico por series de Fourier descrito en el apartado 4.3.2. A continuación, se muestran las tablas de resultados correspondientes a las frecuencias f.e.m. de ventiladores de 40 Hz y 50 Hz para los ensayos sin rejilla, con y sin filtro pasa – bajo:

Ensayo sin rejilla intermedia en circuito inicial					
Nivel del controlador : Batería media / / / $f_{\text{ventiladores}} = 40 \text{ Hz} \Rightarrow v_{\text{promedio}} = 6,81 \text{ m / s}$					
Análisis eléctrico por series de Fourier			Análisis eléctrico por el término de continua según Fourier		
$I_{\text{salida}} = I_{\text{sal}} = I_R$ (A)	$V_{\text{salida}} = V_{\text{sal}} = V_{RS}$ (V)	Potencias _{salida} (W, VAR, VA)	$I_{\text{batería}} = I_{\text{bat}}$ (A)	$V_{\text{salida}} = V_{\text{bat}}$ (V)	Potencia _{batería} (W)
$f_1 = 35,16 \text{ Hz}$ THD = 28,91 %	$f_1 = 35,16 \text{ Hz}$ THD = 4,28 %	Potencia Activa: $P_{\text{trif}} = 24,72 \text{ W}$ Potencia Activa Media: $P_m = 0,009 \text{ W}$ Potencia Reactiva: $Q_{\text{trif}} = 0,003 \text{ VAR}$ $Q_{1^\circ \text{Armon}} = 0,046 \text{ VAR}$ $Q_{\text{Armon } 2^\circ-12^\circ} = -0,043 \text{ VAR}$ Potencia Aparente: $S_{\text{trif}} = 24,72 \text{ VA}$ Desfase $\varphi = 0,01^\circ$, $\text{fp} = 1$	$I_{\text{batería}} = 1,32 \text{ A}$	$V_{\text{batería}} = 12,45 \text{ A}$	A partir de los valores de continua obtenidos por Fourier: Potencia Activa: $P_{\text{monof}} = 16,385 \text{ W}$
$I_{R_media} = 0,05 \text{ A}$ $I_{R_eficaz} = 1,79 \text{ A}$ $I_{R_max} = 2,44 \text{ A}$ FF = 35,36 FP = 1,36	$V_{R_media} = 0,06 \text{ V}$ $V_{R_eficaz} = 4,73 \text{ V}$ $V_{R_max} = 6,68 \text{ V}$ FF = 81,48 FP = 1,41		$f_{\text{Armónico Máx}} = 208,98 \text{ Hz}$ $I_{\text{Armónico Máx}} = 0,46 \text{ A}$ $\varphi_{\text{Armónico Máx}} = -35,88^\circ$ $\left(\frac{I_{\text{Armónico Máx}}}{I_{\text{batería}}}\right) \cdot 100 = 35,22\%$	$f_{\text{Armónico Máx}} = 103,52 \text{ Hz}$ $V_{\text{Armónico Máx}} = 0,17 \text{ V}$ $\varphi_{\text{Armónico Máx}} = -79,24^\circ$ $\left(\frac{I_{\text{Armónico Máx}}}{I_{\text{batería}}}\right) \cdot 100 = 1,35\%$	
Cálculo de la potencia activa promedio			Cálculo de la potencia activa promedio		
$P_T = \overline{3 \cdot p(t)}_{\text{fase}} = 26,54 \text{ W}$		$\Delta P(\%) = -6,87 \%$	$P = \overline{p(t)} = 16,382 \text{ W}$		$\Delta P(\%) = 0,02 \%$
Rendimiento del controlador					
$\eta_{\text{controlador}}(\%) = \frac{P_{\text{batería}}}{P_{\text{salida}}} \times 100 = \frac{P}{P_T} \times 100 = \left(\frac{\overline{p(t)}}{3 \cdot \overline{p(t)}_{\text{fase}}}\right) \times 100 \Rightarrow \eta_{\text{controlador}} = 61,73 \%$					

Tabla 4.12. Análisis de Fourier sin rejilla intermedia, circuito inicial y 40 Hz

Ensayo sin rejilla intermedia en circuito inicial					
Nivel del controlador: Batería media / / / $f_{\text{ventiladores}} = 50 \text{ Hz} \Rightarrow v_{\text{promedio}} = 8,38 \text{ m / s}$					
Análisis eléctrico por series de Fourier			Análisis eléctrico por el término de continua según Fourier		
$I_{\text{salida}} = I_{\text{sal}} = I_R$ (A)	$V_{\text{salida}} = V_{\text{sal}} = V_{RS}$ (V)	Potencias _{salida} (W, VAR, VA)	$I_{\text{batería}} = I_{\text{bat}}$ (A)	$V_{\text{salida}} = V_{\text{bat}}$ (V)	Potencia _{batería} (W)
$f_1 = 42,97 \text{ Hz}$ THD = 31,89 %	$f_1 = 42,97 \text{ Hz}$ THD = 6,70 %	Potencia Activa: $P_{\text{trif}} = 36,45 \text{ W}$ Potencia Activa Media: $P_m = 0,019 \text{ W}$ Potencia Reactiva: $Q_{\text{trif}} = 0,07 \text{ VAR}$ $Q_{1^\circ \text{Armon}} = 2,53 \text{ VAR}$ $Q_{\text{Armon } 2^\circ-12^\circ} = -2,45 \text{ VAR}$ Potencia Aparente: $S_{\text{trif}} = 36,45 \text{ VA}$ Desfase $\varphi = 0,12^\circ$, fp = 1	$I_{\text{batería}} = 2,83 \text{ A}$	$V_{\text{batería}} = 12,65 \text{ A}$	A partir de los valores de continua obtenidos por <i>Fourier</i> : Potencia Activa: $P_{\text{monof}} = 35,783 \text{ W}$
$I_{R_media} = 0,04 \text{ A}$ $I_{R_eficaz} = 2,53 \text{ A}$ $I_{R_max} = 3,41 \text{ A}$ FF = 62,48 FP = 1,35	$V_{R_media} = 0,154 \text{ V}$ $V_{R_eficaz} = 4,96 \text{ V}$ $V_{R_max} = 7,00 \text{ V}$ FF = 32,32 FP = 1,41		$f_{\text{Armónico Máx}} = 261,72 \text{ Hz}$ $I_{\text{Armónico Máx}} = 0,52 \text{ A}$ $\varphi_{\text{Armónico Máx}} = 64,87^\circ$ $\left(\frac{I_{\text{Armónico Máx}}}{I_{\text{batería}}}\right) \cdot 100 = 18,24\%$	$f_{\text{Armónico Máx}} = 109,38 \text{ Hz}$ $V_{\text{Armónico Máx}} = 0,17 \text{ V}$ $\varphi_{\text{Armónico Máx}} = -67,36^\circ$ $\left(\frac{I_{\text{Armónico Máx}}}{I_{\text{batería}}}\right) \cdot 100 = 1,31\%$	
Cálculo de la potencia activa promedio			Cálculo de la potencia activa promedio		
$P_T = \overline{3 \cdot p(t)}_{\text{fase}} = 52,41 \text{ W}$		$\Delta P(\%) = -30,45 \%$	$P = \overline{p(t)} = 35,785 \text{ W}$		$\Delta P(\%) = -0,005 \%$
Rendimiento del controlador					
$\eta_{\text{controlador}}(\%) = \frac{P_{\text{batería}}}{P_{\text{salida}}} \times 100 = \frac{P}{P_T} \times 100 = \left(\frac{\overline{p(t)}}{\overline{3 \cdot p(t)}_{\text{fase}}}\right) \times 100 \Rightarrow \eta_{\text{controlador}} = 68,28 \%$					

Tabla 4.13. Análisis de Fourier sin rejilla intermedia, circuito inicial y 40 Hz

Ensayo sin rejilla intermedia con filtro pasa – bajo					
Nivel del controlador : Batería media / / / $f_{\text{ventiladores}} = 40 \text{ Hz} \Rightarrow v_{\text{promedio}} = 6,81 \text{ m / s}$					
Análisis eléctrico por series de Fourier			Análisis eléctrico por el término de continua según Fourier		
$I_{\text{salida}} = I_{\text{sal}} = I_R$ (A)	$V_{\text{salida}} = V_{\text{sal}} = V_{RS}$ (V)	Potencias _{salida} (W, VAR, VA)	$I_{\text{batería}} = I_{\text{bat}}$ (A)	$V_{\text{salida}} = V_{\text{bat}}$ (V)	Potencia _{batería} (W)
$f_1 = 35,16 \text{ Hz}$ THD = 24,95 %	$f_1 = 35,16 \text{ Hz}$ THD = 4,37 %	Potencia Activa: $P_{\text{trif}} = 25,54 \text{ W}$ Potencia Activa Media: $P_m = 0,04 \text{ W}$ Potencia Reactiva: $Q_{\text{trif}} = 0 \text{ VAR}$ $Q_{1^\circ \text{Armon}} = 0,025 \text{ VAR}$ $Q_{\text{Armon } 2^\circ-12^\circ} = -0,025 \text{ VAR}$ Potencia Aparente: $S_{\text{trif}} = 25,54 \text{ VA}$ Desfase $\varphi = 0^\circ$, $\text{fp} = 1$	$I_{\text{batería}} = 1,26 \text{ A}$	$V_{\text{batería}} = 12,54 \text{ A}$	A partir de los valores de continua obtenidos por Fourier: Potencia Activa: $P_{\text{monof}} = 15,836 \text{ W}$
$I_{R_media} = 0,09 \text{ A}$ $I_{R_eficaz} = 1,83 \text{ A}$ $I_{R_max} = 2,51 \text{ A}$ FF = 20,54 FP = 1,37	$V_{R_media} = 0,13 \text{ V}$ $V_{R_eficaz} = 4,75 \text{ V}$ $V_{R_max} = 6,72 \text{ V}$ FF = 36,36 FP = 1,41		$f_{\text{Armónico Máx}} = 183,59 \text{ Hz}$ $I_{\text{Armónico Máx}} = 0,02 \text{ A}$ $\varphi_{\text{Armónico Máx}} = -76,97^\circ$ $\left(\frac{I_{\text{Armónico Máx}}}{I_{\text{batería}}}\right) \cdot 100 = 1,89\%$	$f_{\text{Armónico Máx}} = 111,33 \text{ Hz}$ $V_{\text{Armónico Máx}} = 0,17 \text{ V}$ $\varphi_{\text{Armónico Máx}} = -66,08^\circ$ $\left(\frac{I_{\text{Armónico Máx}}}{I_{\text{batería}}}\right) \cdot 100 = 1,34\%$	
Cálculo de la potencia activa promedio			Cálculo de la potencia activa promedio		
$P_T = 3 \cdot \overline{p(t)}_{\text{fase}} = 26,70 \text{ W}$		$\Delta P(\%) = -4,34 \%$	$P = \overline{p(t)} = 15,839 \text{ W}$		$\Delta P(\%) = -0,02 \%$
Rendimiento del controlador					
$\eta_{\text{controlador}}(\%) = \frac{P_{\text{batería}}}{P_{\text{salida}}} \times 100 = \frac{P}{P_T} \times 100 = \left(\frac{\overline{p(t)}}{3 \cdot \overline{p(t)}_{\text{fase}}}\right) \times 100 \Rightarrow \eta_{\text{controlador}} = 59,32 \%$					

Tabla 4.14. Análisis de Fourier sin rejilla intermedia, circuito inicial y 40 Hz

Ensayo sin rejilla intermedia con filtro pasa – bajo					
Nivel del controlador: Batería media / / / $f_{\text{ventiladores}} = 50 \text{ Hz} \Rightarrow v_{\text{promedio}} = 8,38 \text{ m / s}$					
Análisis eléctrico por series de Fourier			Análisis eléctrico por el término de continua según Fourier		
$I_{\text{salida}} = I_{\text{sal}} = I_R$ (A)	$V_{\text{salida}} = V_{\text{sal}} = V_{RS}$ (V)	Potencias _{salida} (W, VAR, VA)	$I_{\text{batería}} = I_{\text{bat}}$ (A)	$V_{\text{salida}} = V_{\text{bat}}$ (V)	Potencia _{batería} (W)
$f_1 = 37,11 \text{ Hz}$ THD = 29,76 %	$f_1 = 37,11 \text{ Hz}$ THD = 6,46 %	Potencia Activa: $P_{\text{trif}} = 38,51 \text{ W}$ Potencia Activa Media: $P_m = 0,002 \text{ W}$ Potencia Reactiva: $Q_{\text{trif}} = 0,03 \text{ VAR}$ $Q_{1^\circ \text{Armon}} = 0,86 \text{ VAR}$ $Q_{\text{Armon } 2^\circ-12^\circ} = -0,83 \text{ VAR}$ Potencia Aparente: $S_{\text{trif}} = 38,51 \text{ VA}$ Desfase $\varphi = 0,05^\circ$, fp = 1	$I_{\text{batería}} = 2,17 \text{ A}$	$V_{\text{batería}} = 12,60 \text{ A}$	A partir de los valores de continua obtenidos por Fourier: Potencia Activa: $P_{\text{monof}} = 27,362 \text{ W}$
$I_{R_media} = 0,007 \text{ A}$ $I_{R_eficaz} = 2,79 \text{ A}$ $I_{R_max} = 3,77 \text{ A}$ FF = 422,8 FP = 1,36	$V_{R_media} = 0,10 \text{ V}$ $V_{R_eficaz} = 4,73 \text{ V}$ $V_{R_max} = 6,68 \text{ V}$ FF = 49,37 FP = 1,41		$f_{\text{Armónico Máx}} = 101,56 \text{ Hz}$ $I_{\text{Armónico Máx}} = 0,03 \text{ A}$ $\varphi_{\text{Armónico Máx}} = -81,27^\circ$ $\left(\frac{I_{\text{Armónico Máx}}}{I_{\text{batería}}}\right) \cdot 100 = 1,44\%$	$f_{\text{Armónico Máx}} = 99,61 \text{ Hz}$ $V_{\text{Armónico Máx}} = 0,18 \text{ V}$ $\varphi_{\text{Armónico Máx}} = -88,86^\circ$ $\left(\frac{I_{\text{Armónico Máx}}}{I_{\text{batería}}}\right) \cdot 100 = 1,41\%$	
Cálculo de la potencia activa promedio			Cálculo de la potencia activa promedio		
$P_T = 3 \cdot \overline{p(t)}_{\text{fase}} = 44,14 \text{ W}$		$\Delta P(\%) = -12,75 \%$	$P = \overline{p(t)} = 27,362 \text{ W}$		$\Delta P(\%) = 0 \%$
Rendimiento del controlador					
$\eta_{\text{controlador}}(\%) = \frac{P_{\text{batería}}}{P_{\text{salida}}} \times 100 = \frac{P}{P_T} \times 100 = \left(\frac{\overline{p(t)}}{3 \cdot \overline{p(t)}_{\text{fase}}}\right) \times 100 \Rightarrow \eta_{\text{controlador}} = 61,99 \%$					

Tabla 4.15. Análisis de Fourier sin rejilla intermedia, circuito inicial y 40 Hz

A continuación, se muestran las gráficas más representativas propias del análisis de Fourier para el caso de máxima velocidad de viento en el caso de circuito con filtro pasa – bajo:

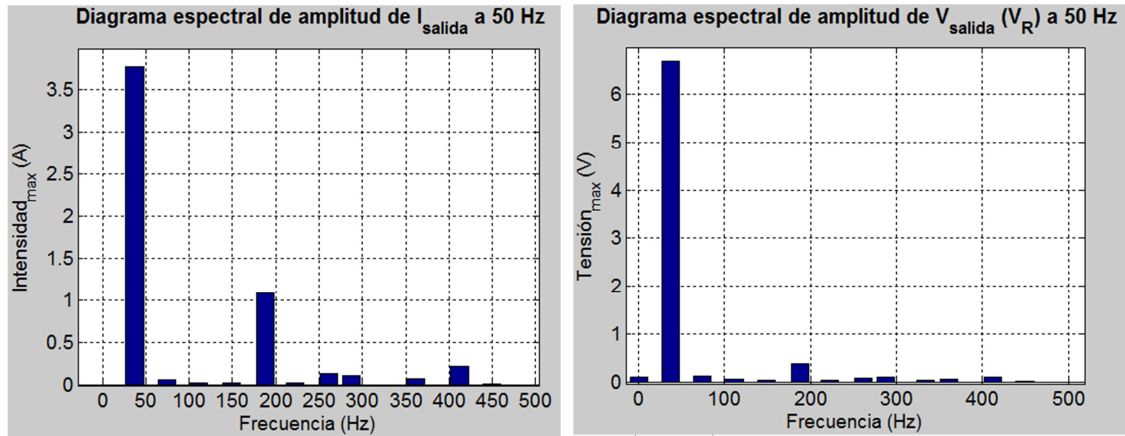


Figura 4.46. Diagrama espectral de amplitud de I y V de salida, sin rejilla, con bobina y 50 Hz

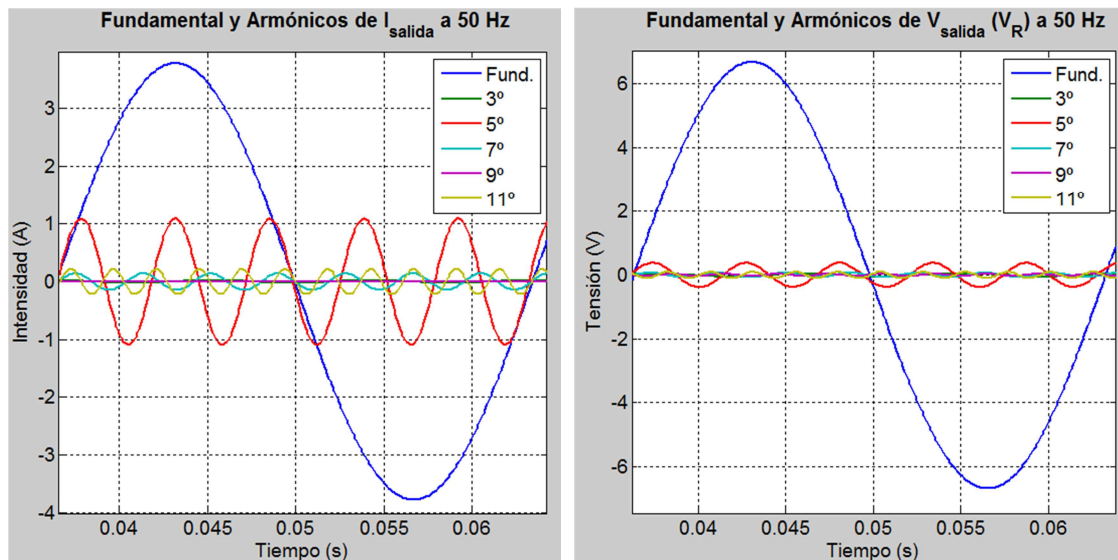


Figura 4.47. Fundamental y armónicos de V e I de salida sin rejilla, con bobina y 50 Hz

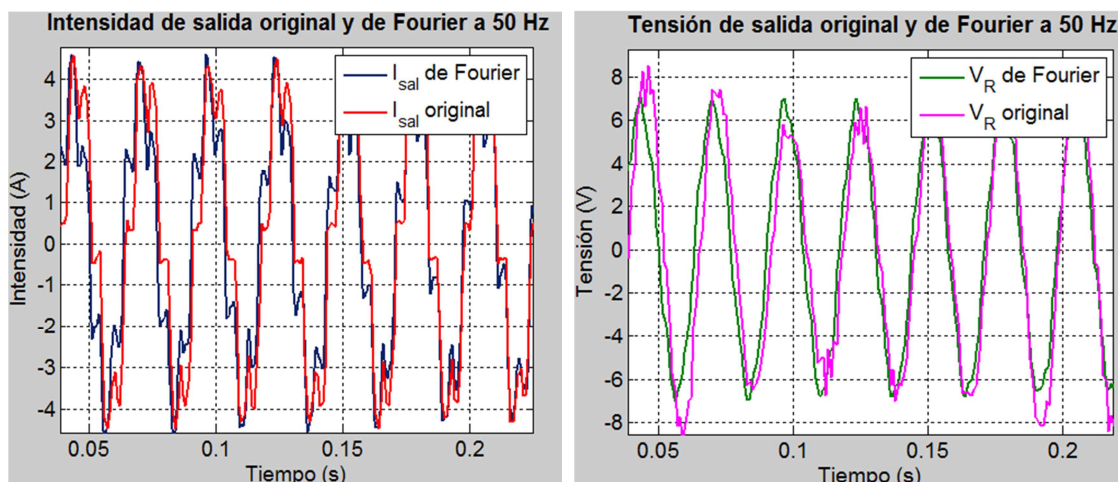


Figura 4.48. Tensión e intensidad de salida por Fourier, sin rejilla, con bobina y 50 Hz

• **Comentarios a los resultados del análisis trigonométrico por series de Fourier**

1. En los **parámetros de salida** del aerogenerador se cumple que:
 - 1.1. La distorsión de la señal de intensidad de salida disminuye en el circuito con filtro pasa – bajo con respecto al circuito inicial.
 - 1.2. La potencia de salida disminuye cuando se introduce la bobina. Esto era de esperar ya que se introduce un nuevo elemento pasivo en el circuito eléctrico.
 - 1.3. Como era de esperar, los armónicos más importantes son los impares: 3º, 5º, 7º y 11º. Esto es debido a que las presentes señales de salida son ondas senoidales: alternadas y de simetría impar.
2. En los **parámetros de batería** se obtiene que:
 - 2.1. La intensidad de batería sufre una reducción de la distorsión cuando se instala el filtro pasa – bajo. Hay una disminución de ruido tanto en frecuencia como en amplitud.
 - 2.2. La potencia de batería también se ve reducida cuando se añade el filtro pasa – bajo. De forma análoga a la disminución de la potencia de salida, esta reducción se debe al nuevo elemento pasivo en el circuito como es la bobina.
3. **El rendimiento del controlador es menor en el caso del circuito con bobina.**

Para cuantificar numéricamente las anteriores conclusiones, se definen las siguientes variaciones de porcentajes asociadas a cada parámetro del circuito determinado. Destacar que el subíndice “L” denota valores asociados al circuito con bobina (filtro pasa – bajo); y que el subíndice “o”, es referido a todo aquello del circuito inicial:

Variación porcentual de parámetros circuito inicial y circuito con bobina		
Parámetros de salida		Rendimiento
I_{salida}	P_{salida}	η_{controlador}
ΔTHD_I (%)	ΔP_{salida} (%)	Δη_{controlador} (%)
$\left(\frac{THD_{I_L} - THD_{I_o}}{THD_{I_o}} \right) \times 100$	$\left(\frac{P_{sal_L} - P_{sal_o}}{P_{sal_o}} \right) \times 100$	$\left(\frac{\eta_{cont_L} - \eta_{cont_o}}{\eta_{cont_o}} \right) \times 100$
Parámetros de batería		
I_{batería}		P_{batería}
Δf_{Arm_Máx} (%)	Δ$\left(\frac{I_{Arm_Máx}}{I_{batería}} \right) = \Delta(K)$ (%)	ΔP_{batería} (%)
$\left(\frac{f_{Armón_Máx_L} - f_{Armón_Máx_o}}{f_{Armón_Máx_o}} \right) \times 100$	$\left(\frac{K_L - K_o}{K_o} \right) \times 100$	$\left(\frac{P_{bat_L} - P_{bat_o}}{P_{bat_o}} \right) \times 100$

Tabla 4.16. Variación porcentual de parámetros entre circuito con bobina y circuito inicial I

Así, sustituyendo todas las ecuaciones anteriores en los ensayos para $f_{\text{ventiladores}}$ de 40 Hz y 50 Hz, se obtienen los siguientes valores de estos parámetros:

Comparativa entre circuito inicial y circuito con filtro pasa – bajo: Variación porcentual de parámetros						
$f_{\text{ventiladores}}$ (Hz)	Parámetros de salida		Parámetros de batería			Rendimiento
	I_{salida}	P_{salida}	$I_{\text{batería}}$		$P_{\text{batería}}$	$\eta_{\text{controlador}}$
	ΔTHD_I (%)	ΔP_{salida} (%)	$\Delta f_{\text{Arm_Máx}}$ (%)	$\Delta \left(\frac{I_{\text{Arm_Máx}}}{I_{\text{batería}}} \right) = \Delta(K)$ (%)	$\Delta P_{\text{batería}}$ (%)	$\Delta \eta_{\text{controlador}}$ (%)
40	-13,70	0,60	-12,15	-94,63	-3,31	-3,90
50	-6,68	-15,78	-61,20	-92,11	-23,54	-9,21

Tabla 4.17. Variación porcentual de parámetros entre circuito con bobina y circuito inicial II

4.7.5. Curva característica exterior

Para completar esta curva experimental, se han realizado tres ensayos a velocidad de viento máxima, cada uno de ellos a distintos niveles de tensión de batería. Los resultados han sido los siguientes:

Ensayos sin rejilla intermedia							
Ensayo 1: Nivel del controlador medio							
v (m/s)	I_R (A)	V_R (V)	P_{salida} (W)	I_b (A)	V_b (V)	$P_{\text{batería}}$ (W)	η_{cont} (%)
8,38	2,86	5,35	43,68	2,27	12,56	28,46	65,15
Ensayo 2: Nivel del controlador medio							
v (m/s)	I_R (A)	V_R (V)	P_{salida} (W)	I_b (A)	V_b (V)	$P_{\text{batería}}$ (W)	η_{cont} (%)
8,38	2,98	5,23	44,89	2,36	12,77	30,14	67,14
Ensayo 3: Nivel del controlador completo							
v (m/s)	I_R (A)	V_R (V)	P_{salida} (W)	I_b (A)	V_b (V)	$P_{\text{batería}}$ (W)	η_{cont} (%)
8,38	2,80	4,94	39,56	1,83	12,91	23,60	59,67

Tabla 4.18. Datos curva característica exterior a distinta tensión de batería

Nótese que en el caso de los datos obtenidos en los ensayos a nivel de controlador medio, la curva característica exterior sigue la misma tendencia que la teórica definida en la figuras 4.2 y 4.8.

Sin embargo, si se compara los resultados del ensayo 1 y 2 con los del ensayo 3, se observa que al pasar a nivel completo de controlador, no se da la misma variación que la curva característica exterior.

Para visualizar estos dos comportamientos del sistema, se muestran las dos figuras siguientes:

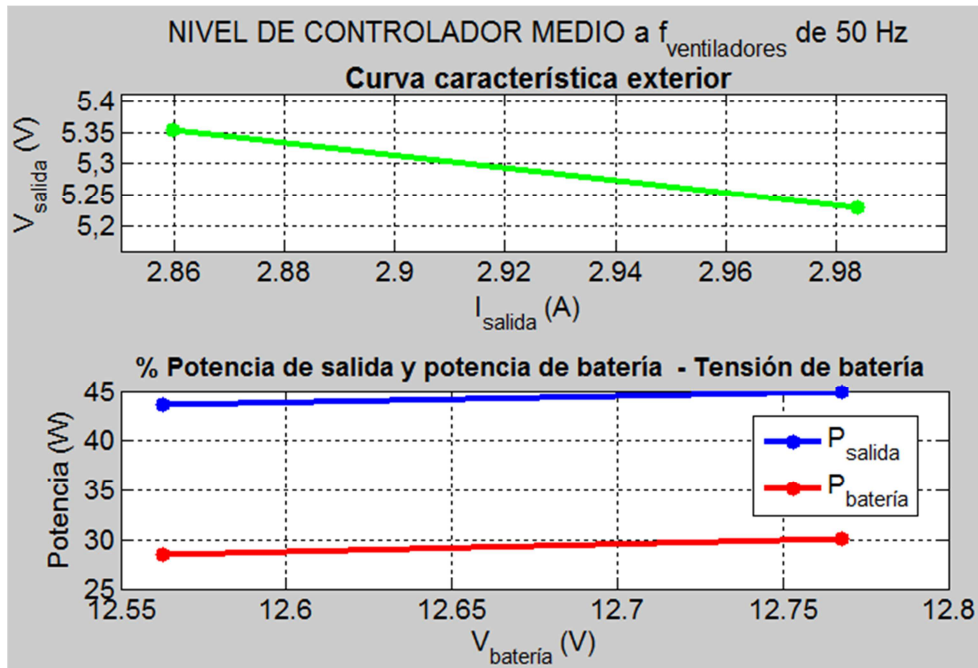


Figura 4.49. Curva característica exterior I

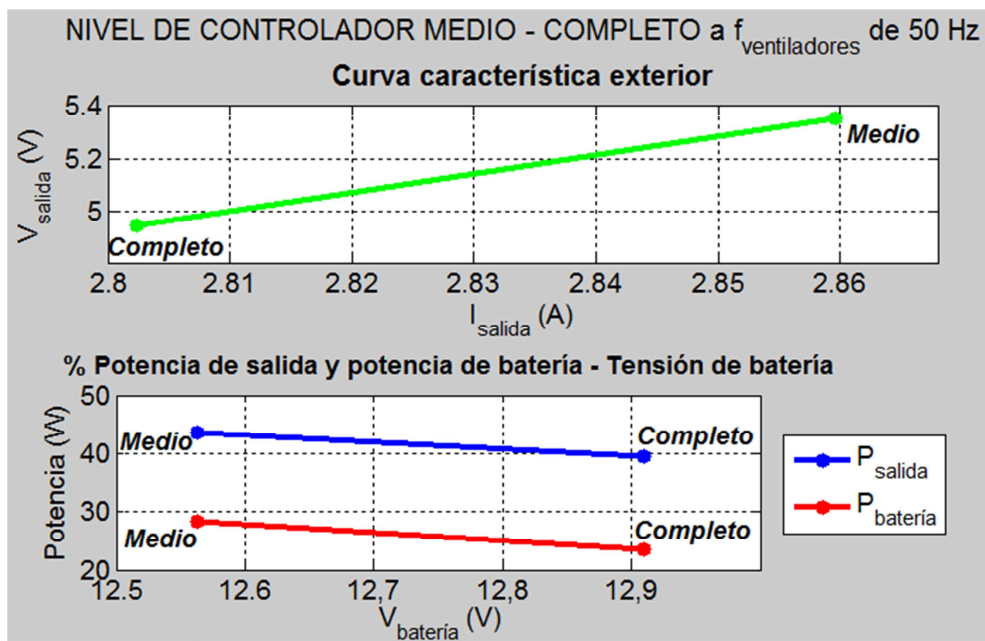


Figura 4.50. Curva característica exterior II

4.7.6. Conclusiones de los ensayos sin rejilla intermedia

- 1) Al introducir el filtro pasa – bajo, se disminuye en aproximadamente un 90 % la distorsión en amplitud de la intensidad de batería:

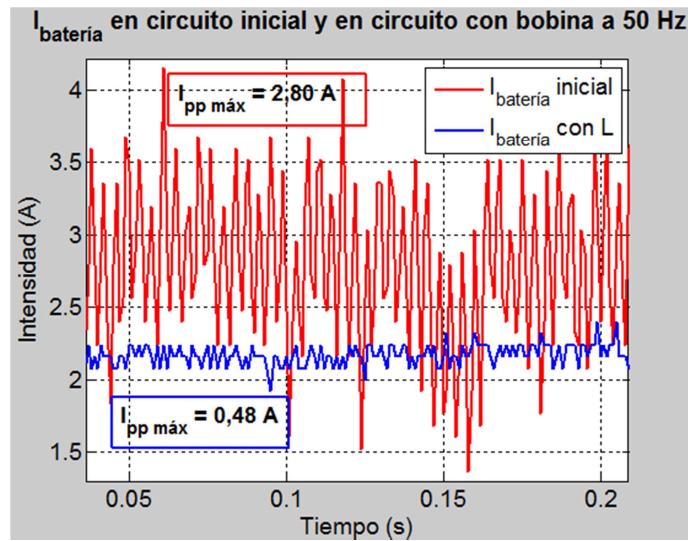


Figura 4.51. Intensidad de batería en circuito inicial y en circuito con bobina a 50 Hz

- 2) Hay una reducción en el THD de los valores de salida. Sin embargo, la reducción en la intensidad de salida no es suficiente. Las dos señales de intensidad de salida obtenidas con el filtro pasa – bajo, disponen de un THD de 29,76 % y de 24,95 %.

• Normativa de la calidad de la señal eléctrica en instalaciones industriales

Las normas que regulan la calidad de las señales eléctricas de equipos industriales, a lo que armónicos se refiere son dos:

- CEI 61003 – 4: 1998*. “Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3 – 4: Límites. Limitación de las emisiones de corrientes armónicas en las redes de baja tensión para equipos con corriente asignada superior a 16 A”.
- UNE – En 61000-2-4: 2004*. “Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2 – 4: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia en las instalaciones industriales”.

a) *CEI 61003 – 4: 1998*

Aplicando los cálculos que marca la norma para clasificar la presente instalación industrial, se muestra el valor de los armónicos máximos en intensidad:

Aplicación de la norma <i>CEI 61003 – 4:1998</i>						
Armónico n	3	5	7	9	11	Pares
Intensidad admisible: I_n/I_1 (%)	21,6	10,7	7,2	3,8	3,1	0,6

Tabla 4.19. Aplicación de la norma *CEI 61003 – 4: 1998*

b) UNE – En 61000-2-4:2004

Atendiendo al contenido de la norma, se clasifica la instalación en “Clase 2: Entorno industrial normal”. Así, ya se puede localizar en la tabla el **THD máximo permitido en la señal de tensión, que es igual a un 8%**.

Aplicando la anterior normativa se concluye:

1. **Sí se cumple el THD en tensión**, tanto para el caso inicial como con la bobina.
2. **No se cumple el THD máximo en intensidad**. Por ejemplo, véase la figura 4.46, en la que se justifica que 5º armónico es mayor que el 10,7 % estipulado como máximo en su correspondiente norma.
- 3) **Cuando se ha añadido la bobina, el controlador empieza a cargarse más rápidamente**, es decir, se enciende antes, que en el circuito inicial. Aunque en ambos casos la frecuencia de f.e.m. de ventiladores mínima para la carga del controlador es de 20 Hz. Esto es debido a la pequeña mejora en la calidad de las señales, introduciendo así menos ruido al puente de diodos, favoreciendo así la conmutación.
- 4) **Se empieza a generar potencia con menos velocidad de viento en el caso del filtro pasa – bajo**. En este ensayo se requiere una $f_{\text{ventiladores}}$ de 25 Hz, mientras que en el circuito inicial se necesita de una $f_{\text{ventiladores}}$ de 30 Hz. No se puede asignar una velocidad de arranque óptima, ya que no se ha medido el perfil completo de velocidades en este escenario.
- 5) **Se recomienda la presencia del filtro pasa – bajo aunque suponga una reducción de la potencia**. La mayoría de las cargas en continua no soportan la distorsión de la intensidad de batería en el circuito inicial.
- 6) **La potencia reactiva es nula aproximadamente con y sin bobina**. De ahí se justifica que las cargas resistivas del sistema eléctrico contrarrestan a las inductivas. Nótese que la energía reactiva del primer armónico siempre es positiva, y mayor o igual en módulo que la energía reactiva de los armónicos restantes (2º-12º). Ésta última energía reactiva siempre es negativa.
- 7) Además, se confirma que **el sistema eléctrico está subexcitado ($Q_{\text{gen}} = 0$), o en su defecto, levemente sobreexcitado ($Q_{\text{gen}} > 0$)**. Así, se justifica el carácter resistivo – inductivo del circuito eléctrico, aunque predomine el comportamiento resistivo.
- 8) Se justifica que el fdp del generador es el fdp de la cargas. Al ser las cargas predominantemente resistivas, el **fdp es igual a la unidad**.
- 9) **Interesa que el controlador permanezca en nivel medio, para así generar mayor potencia eléctrica**. Véase la curva característica exterior de la figura 4.50, en la que al pasar del nivel medio al nivel completo del controlador, disminuye la potencia de salida como de batería.

4.8. Ensayos con tobera reductora

4.8.1. Ensayos en carga: controlador y batería conectados

De forma análoga a los anteriores escenarios, se muestran los resultados eléctricos tras los ensayos en el circuito inicial (figura 4.26):

Ensayos con tobera reductora							
Nivel del controlador: Batería media							
v (m/s)	I _R (A)	V _R (V)	P _{salida} (W)	I _b (A)	V _b (V)	P _{batería} (W)	η _{cont} (%)
10,98	5,70	8,11	131,33	9,34	13,10	122,28	93,11
9,70	4,87	7,24	95,62	5,30	12,97	68,82	71,98
8,53	3,65	6,18	64,71	3,68	12,80	47,08	72,77
7,36	2,68	5,36	41,19	2,29	12,70	29,14	70,74
6,22	1,86	5,16	26,67	1,31	12,61	16,56	62,11
5,06	1,33	4,23	14,66	0,75	12,56	9,44	64,36
3,95	0,68	4,05	6,94	0,24	12,54	2,99	43,05
2,85	0,25	3,12	1,55	0,03	12,57	0,40	25,59

Tabla 4.20. Resultados ensayos con tobera reductora y en carga

De forma análoga a los anteriores ensayos, se pueden mostrar las gráficas de las variables eléctricas más significativas para velocidad de viento máxima:

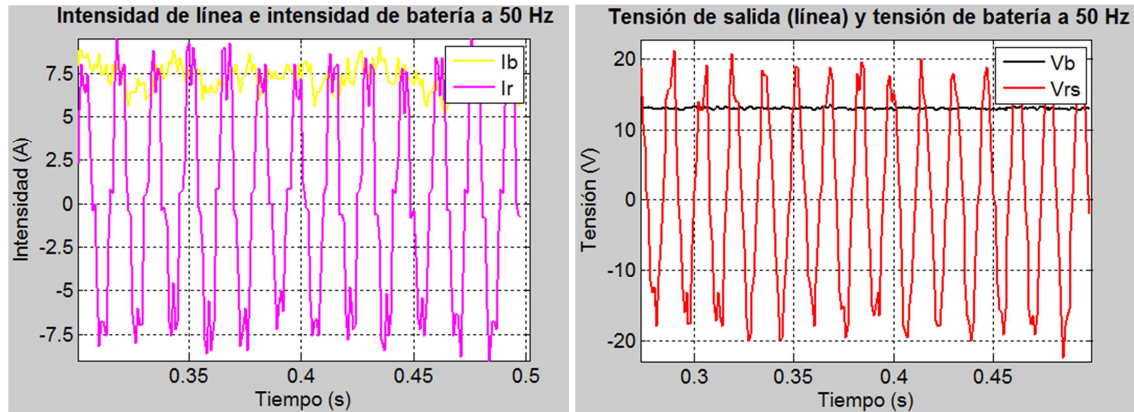


Figura 4.52. I y V de entrada y salida del cont., 50 Hz, con tobera reductora

Nótese en la figura anterior, que los valores de intensidad de salida y de batería siguen teniendo una alta distorsión en la forma de onda.

A continuación, destaca la curva de la potencia de batería, en la que su promedio queda por encima de sus valores máximos. Si representamos los 0,5 s, se observa una forma de onda muy irregular, lejos de parecerse a una onda rectificadora en continua. Para ver este hecho véase la figura 4.54. Esta gran distorsión en la potencia de batería es debida a la intensidad de batería, mostrada ésta en todo su tiempo de medida en la figura 4.55:

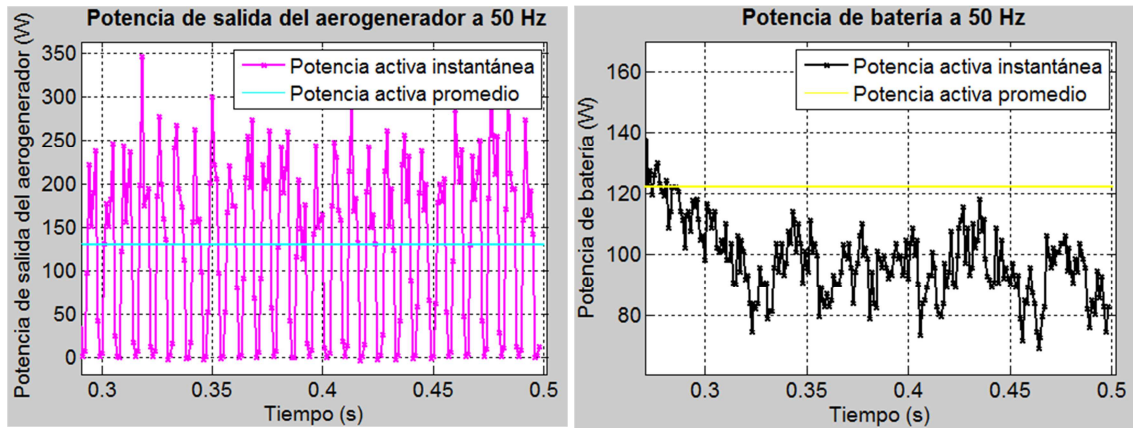


Figura 4.53. Potencia de salida y potencia de batería, 50 Hz, con tobera reductora

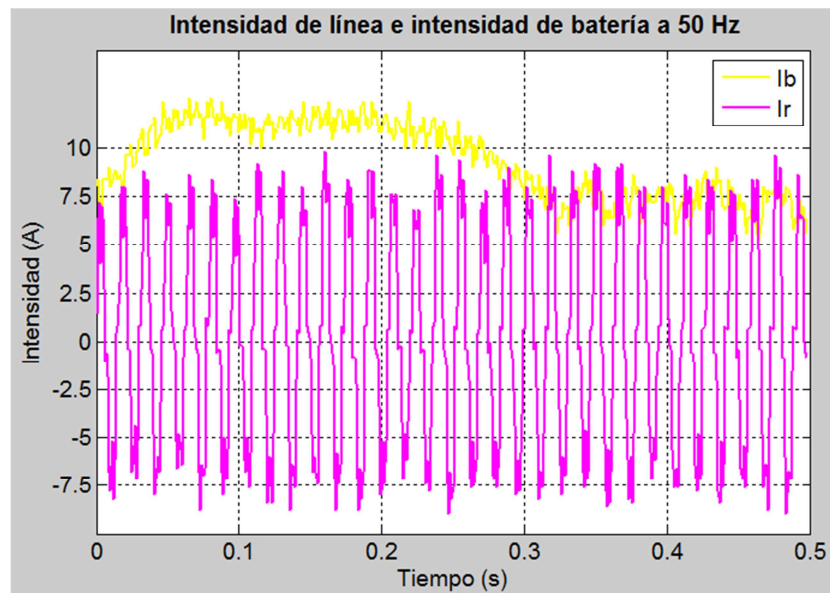


Figura 4.54. Intensidades a 50 Hz, con tobera reductora y 0,5 s

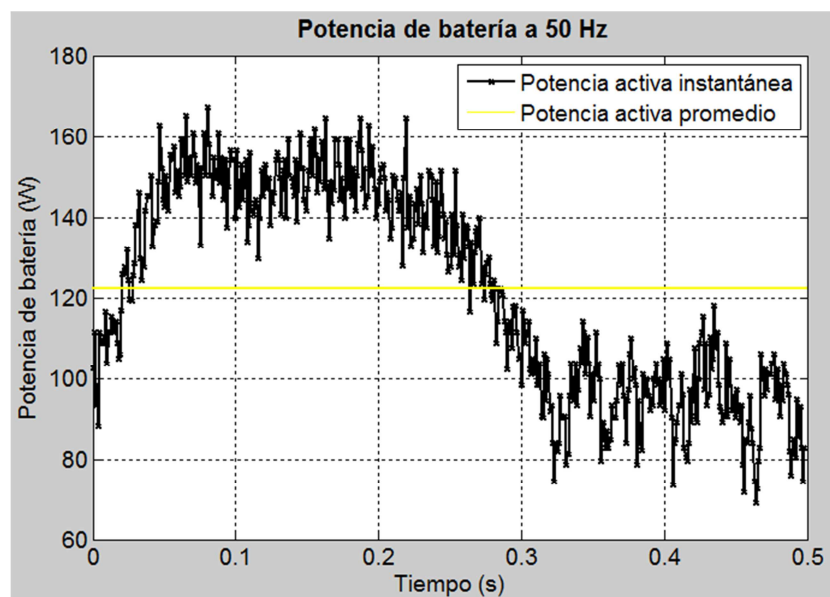


Figura 4.55. Potencia de batería a 50 Hz, con tobera reductora y 0,5 s

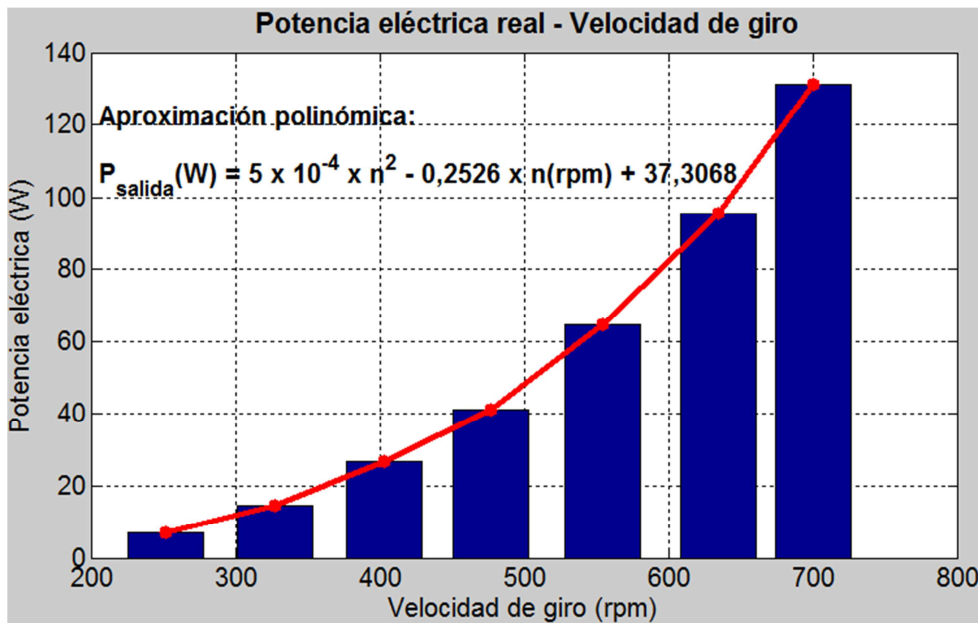


Figura 4.56. Potencia de salida – velocidad de giro con tobera reductora

• Curva potencia eléctrica – velocidad de viento

De manera análoga a los ensayos con rejilla intermedia, como se ha conseguido también una homogeneidad de velocidad de viento aceptable, es correcto comparar la potencia eléctrica de salida obtenida con la garantizada por el fabricante.

De igual forma que el caso con rejilla intermedia, primero hay que interpolar gráficamente la potencia teórica que avala el fabricante, para cada una de las velocidades de viento promedio recibida en el área de barrido del aerogenerador. Para ello véase la figura siguiente.

Luego, ya se estaría en condiciones de calcular la variación de potencia teórica y real. Esta variación porcentual se muestra en la figura 4.58.

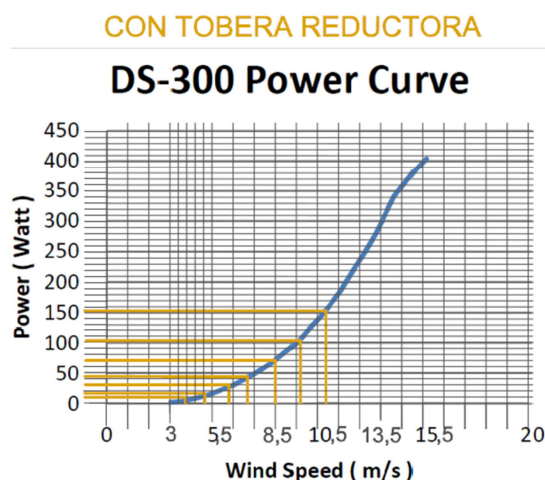


Figura 4.57. Potencia eléctrica – velocidad de viento teórica considerada en tobera

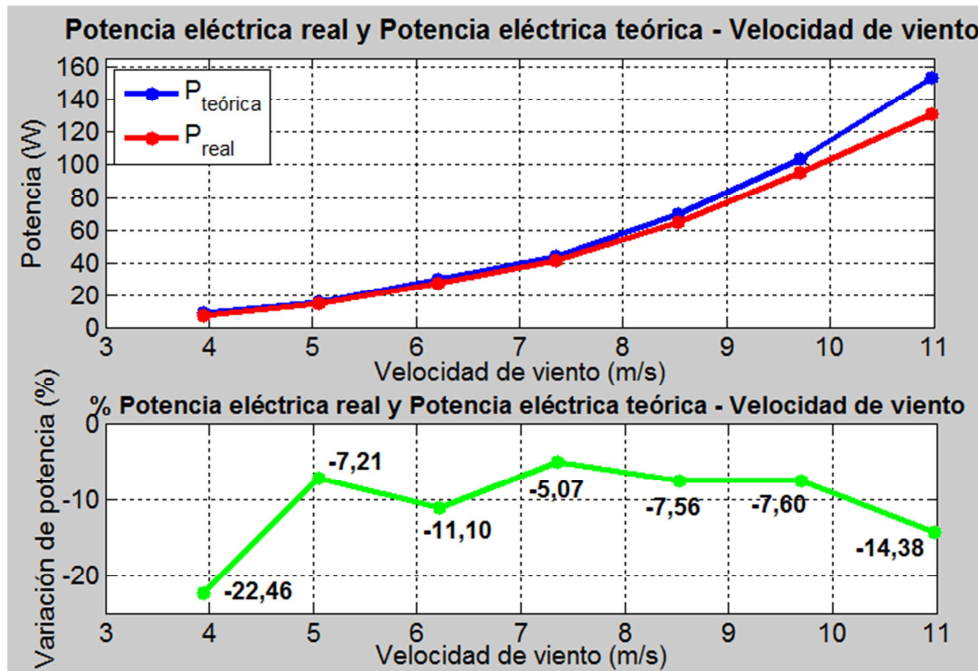


Figura 4.58. Potencia eléctrica – velocidad de viento: real y teórica. Con tobera

Se observa que la mayor diferencia se tiene a la velocidad de 3,95 m/s, siendo un 22,46 % inferior a la indicada por el fabricante. No es de importancia este valor, ya que es de baja potencia. Sin embargo, el dato que sí que importa es a velocidad máxima de viento, en donde existe una disminución de potencia del 14,38 % respecto a lo estipulado teóricamente.

• Velocidad de arranque del aerogenerador

La frecuencia de ventiladores para la que empieza a cargarse el controlador es de 15 Hz. Sin embargo, no comienza a inyectarse potencia en la batería, ya que se obtiene una potencia de batería negativa. Así, se sigue justificando que la velocidad de arranque del aerogenerador DS – 300 es a partir de 3 m/s, ya que a esa frecuencia de ventiladores de 15 Hz, le corresponde una velocidad promedio de viento de 2,85 m/s.

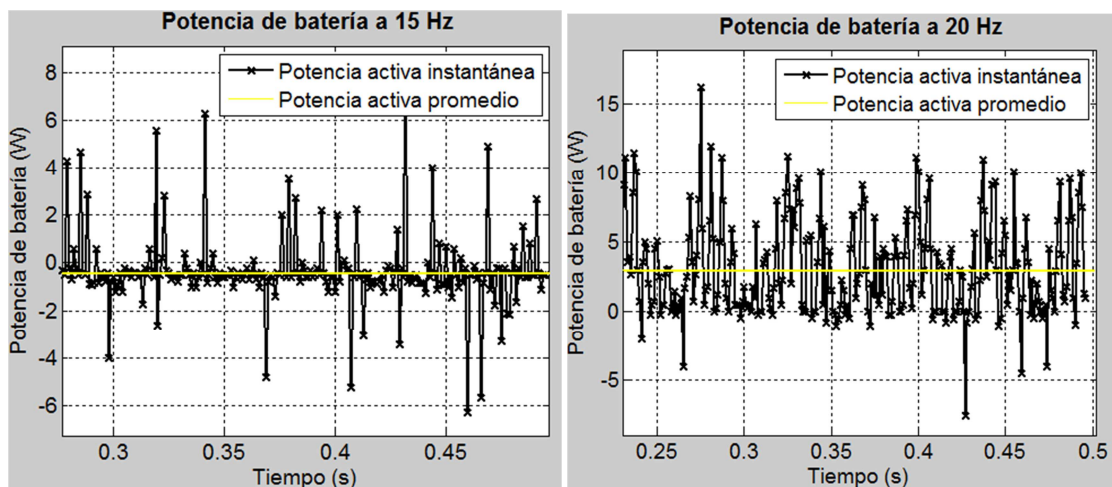


Figura 4.59. Potencia de batería a 15 (izquierda) y 20 Hz (derecha) con tobera reductora

4.8.2. Ensayos en vacío: controlador desconectado

Partiendo del mismo circuito mostrado en la figura 4.23, se obtienen los siguientes resultados de tensiones eficaces de fase (E_R) y frecuencias fundamentales de la señal senoidal (f):

Ensayos en vacío con tobera reductora			
v (m/s)	n (rpm)	E_R (V)	f (Hz)
10,98	700,1	15,04	95,70
9,70	634,9	13,37	85,94
8,53	554,6	11,82	76,17
7,36	476,7	10,02	64,45
6,22	403,5	8,29	54,69
5,06	327,1	6,61	42,97
3,95	252,1	4,46	29,30

Tabla 4.21. Resultados ensayo en vacío con tobera reductora

Si se aplica de nuevo la ecuación que relaciona el número de polos con la velocidad de giro de la máquina, y con la frecuencia de la f.e.m., se mantiene que el número de pares de polos es igual a 8.

A continuación, se puede visualizar como la tensión eficaz en vacío, E_R , así como su frecuencia eléctrica, siguen manteniendo una relación lineal directa con respecto a la velocidad de giro del aerogenerador:

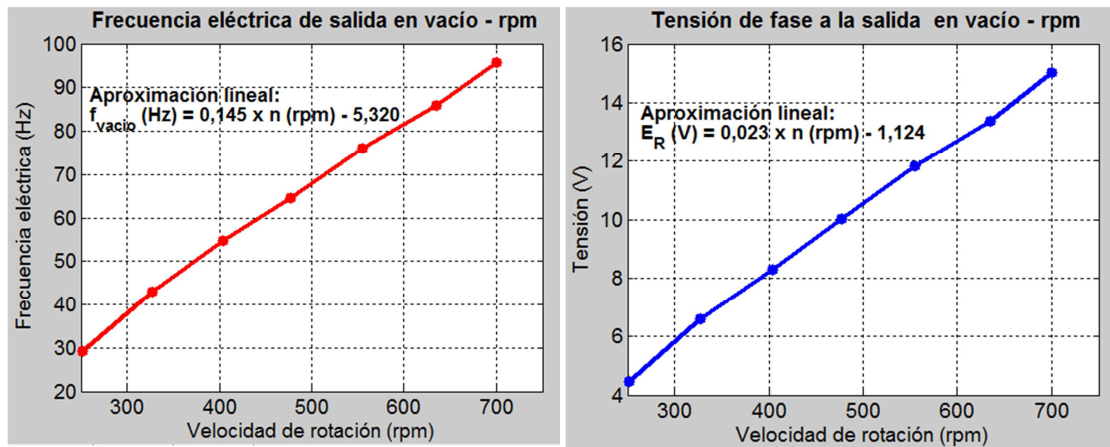


Figura 4.60. Tensión salida en vacío – rpm (izq.). Frec. eléctrica en vacío – rpm (dcha.). Con tobera

4.8.3. Comparativa de resultados de ensayos en vacío y en carga. Factor de regulación

De forma análoga a como se procedía en el caso con rejilla intermedia, ahora en el caso de tobera reductora, se tiene un factor de regulación algo menor, aunque sigue siendo muy elevado:

Así, se sigue manteniendo el comportamiento resistivo – inductivo del circuito, como era de esperar, al disponer de cargas inductivas y resistivas.

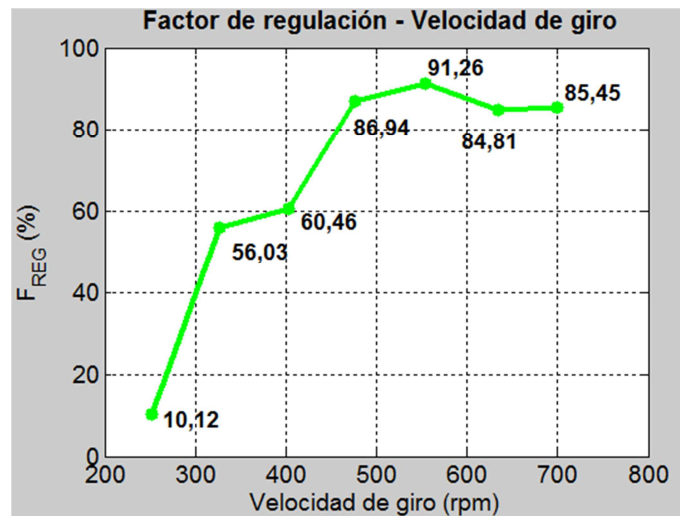


Figura 4.61. Factor de regulación – velocidad de giro. Con tobera reductora

4.8.4. Resultados con filtro pasa – bajo en carga

Partiendo del mismo esquema de la figura 4.43, se tiene los siguientes resultados del análisis eléctrico para el caso con tobera reductora:

Ensayos sin tobera reductora y con filtro pasa – bajo							
Nivel del controlador: Batería media							
v (m/s)	I _R (A)	V _R (V)	P _{salida} (W)	I _b (A)	V _b (V)	P _{batería} (W)	η _{cont} (%)
10,98			Se activa				
9,70			el freno				
8,53	1,10	4,17	12,65	0,12	12,30	1,44	11,43
7,36	2,64	5,22	39,15	1,93	12,42	24,01	61,34
6,22	2,04	4,87	27,64	1,45	12,42	18,01	65,17
5,06	1,30	4,17	14,87	0,74	12,37	9,22	61,97
3,95	0,70	3,95	6,74	0,23	12,33	2,86	42,40
2,85	0,30	3,23	1,72	0,02	12,31	0,27	15,73

Tabla 4.22. Resultados ensayos con tobera reductora, con filtro pasa – bajo y en carga

Se observa que a partir de una frecuencia de ventiladores de 40 Hz, se activa el freno del generador. Es debido a la no compatibilidad entre la bobina empleada como filtro pasa – bajo, y el rectificador de puente de diodos que utiliza el controlador. Destacar, que para los valores inferiores de velocidad de viento (menor a 8,53 m/s), si se comparan estos datos con los resultados del análisis eléctrico inicial de la tabla 4.20, se concluye que son valores semejantes.

4.8.5. Conclusiones de los ensayos con tobera reductora

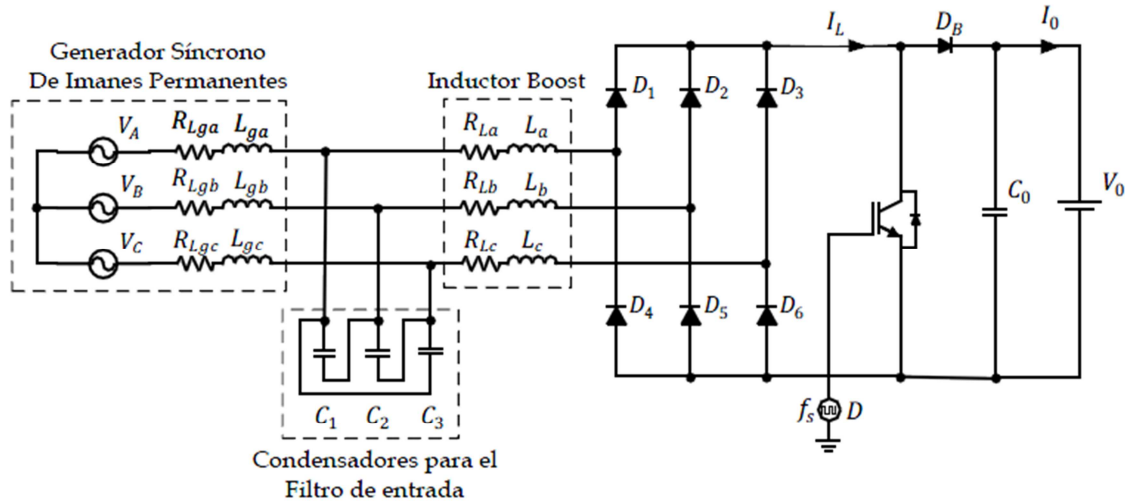
- 1) **Se obtiene una potencia eléctrica máxima de 131,33 W, lejos de la potencia nominal del aerogenerador DS – 300 igual a 300 W.** Todavía restan 2,5 m/s por llegar a la velocidad nominal del aerogenerador, luego no se puede certificar que el aerogenerador no alcanza su potencia nominal. Además, también restan 135 rpm para llegar a la velocidad de giro nominal del aerogenerador.
- 2) **El rendimiento del controlador ha mejorado hasta un 93,11 % a la velocidad de viento de 10,98 m/s, cumpliendo así el mínimo garantizado por el fabricante: 92 %.** Si se observan las figuras 4.54 y 4.55, se muestra un aumento de la intensidad de batería de 0,2 segundos que produce un aumento de la potencia de batería. En ese caso, el aumento en el rendimiento es consecuencia de este pico de potencia. Una sugerencia sería intentar producir mayores velocidades de viento para observar si el rendimiento sigue siendo similar.
- 3) **Sería recomendable diseñar un circuito de rectificación que sustituya al presente controlador.** Se ha justificado que no es posible obtener una calidad de la señal óptima sólo con el controlador. Además, no se puede operar en todos los regímenes de velocidad de giro del aerogenerador cuando se añade el filtro pasa – bajo al circuito inicial (véase apartado anterior). Así, se ha investigado sobre otras posibles opciones en la rectificación alterna – continua del presente sistema, eligiendo de entre todas ellas, la descrita en el siguiente apartado.

4.8.6. Circuito de rectificación alternativo

Se ha buscado información sobre distintos circuitos de rectificación que sustituyan al presente controlador, ya que éste último es el responsable de la alta distorsión de las señales eléctricas del circuito. Se han estudiado opciones como: rectificación de 12 pulsos, rectificadores controlados o filtros digitales. Sin embargo, entre todas las alternativas que se han encontrado, la más adecuada para la rectificación alterna - continua en un alternador trifásico de imanes permanentes es:

Filtro LC + Rectificador no controlado + Convertidor elevador

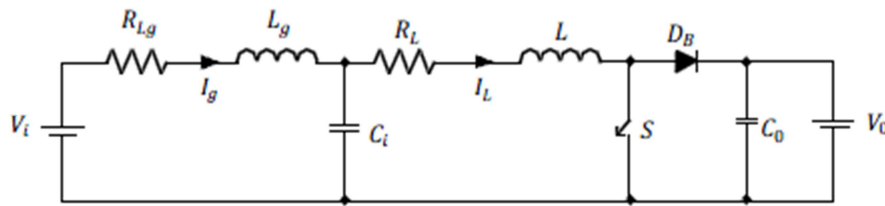
El esquema del sistema eléctrico se muestra en la figura siguiente. En primer lugar, hay que prever que el convertidor elevador (Boost), debe trabajar en modo de conducción discontinua (DCM), para que se disponga del mayor factor de potencia posible. Por esta razón, es necesario establecer el límite para permanecer en DCM, y no pasar al modo de conducción continua (MCC).



Fuente: Tesis doctoral de Óscar Carranza Castillo, Universidad Politécnica de Valencia

Figura 4.62. Esquema eléctrico alternativo para mejorar la distorsión de todas las señales

Después, habrá que pasar al análisis del circuito equivalente del circuito, para calcular la función de transferencia que relacione la entrada con la salida del rectificador, para y así determinar los componentes del filtro L – C, según el rango de trabajo del aerogenerador DS – 300:



Fuente: Tesis doctoral de Óscar Carranza Castillo, Universidad Politécnica de Valencia

Figura 4.63. Circuito equivalente del monofásico del circuito de rectificación alternativo

Recordar que el objetivo es controlar la intensidad que circula por la bobina L, I_L , en conducción discontinua. Es decir, sólo se realimenta I_L , debido a que la tensión de salida es controlada por la batería de continua, V_0 .

Por último, se diseña el circuito de conmutación del transistor IGBT. Para ello, se emplea un modelo del conmutador de modulación por ancho de pulso (PWM). Así, la señal PWM abre y cierra el interruptor según un valor preestablecido corriente, comparando ésta con I_L . Entonces, se asigna el control de modo corriente de pico (PCC), para aplicarlo al convertidor – elevador, y así poder conseguir una baja distorsión de la corriente del aerogenerador en todo el rango de velocidades de que se desea trabajar. Para aplicar este control por PWM, se puede emplear un procesador digital de señal para realizar los cálculos que se requiera.

Por lo tanto, queda descrita brevemente una posible alternativa que disminuiría la distorsión de las señales del circuito, sobre todo, de las intensidades de salida y de batería. Esto conllevaría a un aumento de la potencia de salida, y fundamentalmente un aumento mayor de la potencia de batería, produciendo así un mejor rendimiento eléctrico del circuito de rectificación.

4.9. Cálculo del rendimiento global de la instalación eólica

Se puede establecer un balance energético global, en el que aparezcan las potencias de entrada, las potencias útiles y las pérdidas de potencia en cada uno de los equipos que componen la presente instalación eólica. Para ello se va a representar un diagrama de Sankey de potencias. Así, de un simple vistazo se puede ver cuales son los equipos críticos que disponen de una baja eficiencia.

4.9.1. Cálculo de la potencia eléctrica consumida en la instalación

Para calcular el consumo eléctrico total de la instalación, hay que medir la potencia demandada por los motores de inducción trifásicos que mueven los 4 ventiladores.

Para ello, se mide el balance energético en los variadores de frecuencia, que son los equipos que permiten el completo control de los motores de inducción. En general, un variador de frecuencia es un dispositivo electrónico que presenta el siguiente diagrama de bloques:

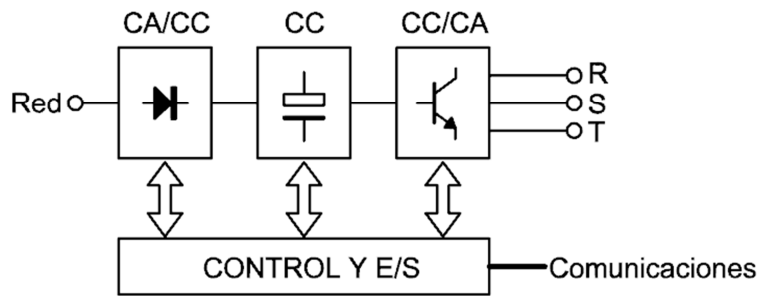


Figura 4.63. Diagrama de bloques de variador de frecuencia

Se ha repetido a lo largo del presente proyecto, que el control es mediante la frecuencia de la f.e.m. de los motores que mueven los ventiladores.

Para obtener las medidas de potencia a la entrada y salida de los variadores se utiliza el software *CX – DRIVE* propio del fabricante de los variadores de frecuencia. Así, se comprueba que las anteriores potencias son iguales, luego el rendimiento en los variadores de frecuencia es del 100 %. Entonces, las medidas de potencia de entrada de estos variadores se corresponderán con la potencia suministrada a los motores que manejan los ventiladores.

A continuación, se muestran los resultados de las potencias de entrada de los motores para cada una de sus frecuencias f.e.m. seleccionadas en cada ensayo, distinguiendo dos potencias consumidas:

- $P_{\text{motores_inferiores}}$: Potencia de entrada de los motores inferiores.
- $P_{\text{motores_superiores}}$: Potencia de entrada de los motores superiores.

Por lo tanto, la potencia eléctrica demanda por la instalación, $P_{\text{instalación}}$, será la suma de las dos potencias anteriores:

	Potencia eléctrica demandada por la instalación								
Frecuencia (Hz)	13	15	20	25	30	35	40	45	50
$P_{\text{motores inferiores}} \text{ (kW)}$	0,6	0,7	1	1,4	1,7	2,1	2,5	2,9	3,1
$P_{\text{motores superiores}} \text{ (kW)}$	0,2	0,2	0,4	0,6	0,9	1,4	2,1	2,9	3,3
$P_{\text{instalación}} \text{ (kW)}$	0,8	0,9	1,4	2,0	2,6	3,5	4,6	5,8	6,4

Tabla 4.23. Potencia eléctrica demandada por la instalación

4.9.2. Diagrama de Sankey de potencia

A continuación, se muestra el diagrama de Sankey de potencia para el ensayo en el que se ha obtenido mayor potencia eléctrica generada. Este ensayo es con tobera reductora a una frecuencia f.e.m. de motores de 50 Hz:

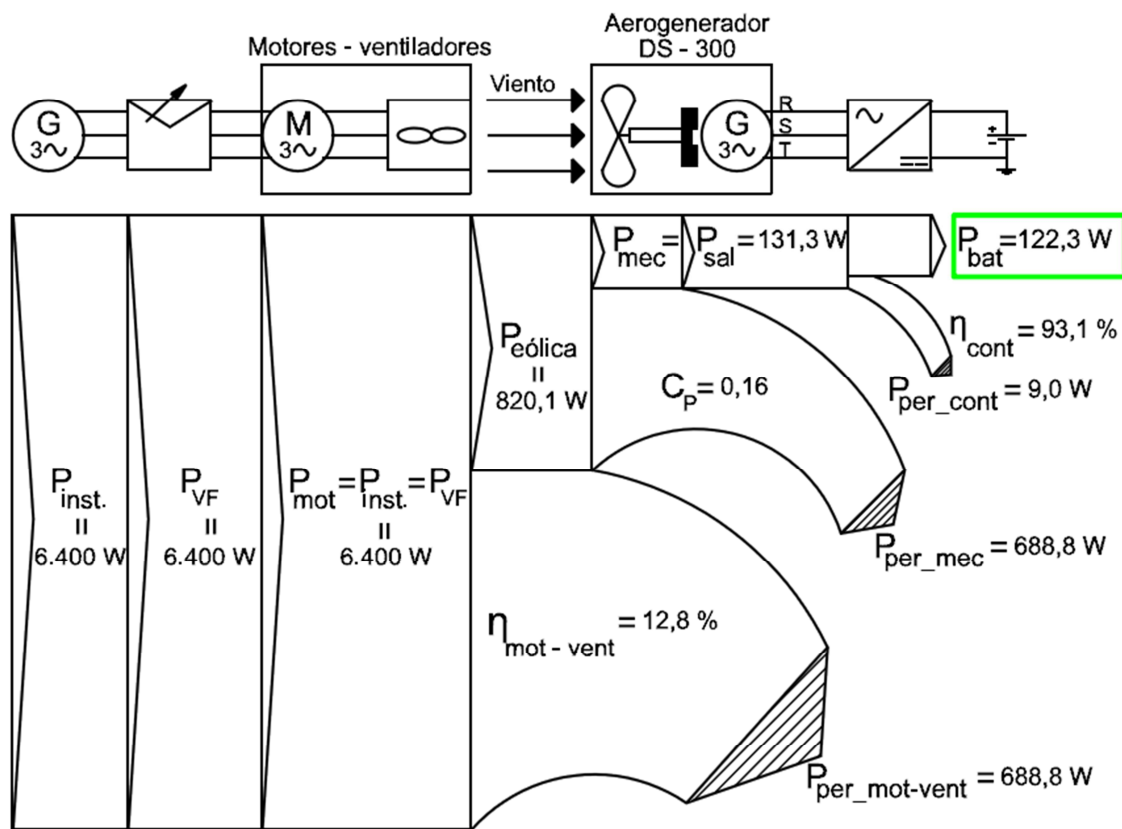


Figura 4.64. Diagrama Sankey para el ensayo de potencia en batería máxima

Se obtiene que las mayores pérdidas aparecen en los motores de inducción que gobiernan los ventiladores, así como la debida a los componentes mecánicos de ésta turbina. En estas pérdidas de potencia ($P_{\text{per_mot-vent}}$), se incluirían también las pérdidas de carga, aunque éstas son minimizadas casi totalmente en el caso con tobera. Según el fabricante de los ventiladores, Sodeca, se garantiza un rendimiento máximo en torno al 30 % para dicho ventilador. Sin embargo, este rendimiento máximo se encuentra a un régimen de velocidad correspondiente a una frecuencia f.e.m. de motores de 30 Hz.

Destacar también que el rendimiento del controlador es elevado en este caso, aunque en los demás ensayos no haya sido así. Por último, aclarar que se puede obtener un C_p mayor si se cambia el aerogenerador a uno de tipo horizontal.

Capítulo 5

Bibliografía

5.1. Libros

- “Energía eólica”. Autor: Antonio Sánchez Kaiser. Editorial: Horacio Escarabajal. Edición: 2.003.
- “Fundamentos de teoría de circuitos”. Autor: Antonio Gómez Expósito. Editorial: Thomson. Edición: 2.007.
- “Máquinas Eléctricas”. Autor: Jesús Fraile Mora. Editorial: Mc Graw – Hill. Edición de 2.003.
- “Electrónica de potencia (I). Aspectos generales y conversión AC/DC”. Autores: José Antonio Villarejo Mañas, Joaquín Roca González y Joaquín Roca Dorda. Editorial: Horacio Escarabajal. Edición: 2.000.

5.2. Trabajos de investigación

- Tesis doctoral: “Estudio de técnicas de control de rectificadores Boost trifásicos con filtro LCL para reducción de distorsión armónica en corriente, aplicadas al procesado eficiente de energía en aerogeneradores síncronos de imanes permanentes operando a velocidad variable”. Autor: Oscar Carranza Castillo. Directores: Emilio Figueres Amorós y Gabriel Garcerá Sanfelú. Fecha: Enero de 2.012.
- Trabajo Fin de Máster: “Desarrollo de un banco de ensayos para la evaluación de las prestaciones de aerogeneradores de pequeña potencia”. Autor: Juan Carlos Serrano Collazo. Director: Antonio Sánchez Kaiser. Titulación: Máster en Energías Renovables (Universidad Politécnica de Cartagena). Fecha: Julio de 2.011.
- Trabajo Fin de Máster: “Diseño, construcción y caracterización de un aerogenerador de baja potencia”. Autor: Pablo Conde Calero. Director: Antonio Sánchez Kaiser. Titulación: Máster en Energías Renovables (Universidad Politécnica de Cartagena). Fecha: 2.012.

5.3. Información de internet

- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDAE: www.idae.es
- Operador del Mercado Ibérico de la Electricidad, OMIE: www.omel.es
- Asociación Española de Normalización, AENOR: www.aenor.es
- “Proyecto de Real Decreto por el que se establece la regulación de las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo”: <http://www.suelosolar.es/newsolares/newsol.asp?id=8479>
- Aerogeneradores de potencia inferior a 100 kW. CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas: http://www.ciemat.es/CIEMATportal/recursos/doc/Areas_Actividad/Prospectiva_Tecnologica/34301686_211200911951.pdf
- Sistemas de generación eléctrica para aerogeneradores: http://www.ute.com.uy/empresa/entorno/Energias_Renovables/eolica/Actividad_2002/Eolica_Generadores.pdf
- Plataforma de un Centro Tecnológico Superior de México. Se aporta información sobre componentes electrónicos: diodos, rectificadores controlados y no controlados: <http://www.itescam.edu.mx>

Fabricantes de los equipos:

- Sodeca, fabricante de ventiladores: <http://www.sodeca.com/>
- Omron, fabricante de variadores de frecuencia: <http://omron.es/es/home>
- Sensovant, distribuidor de sensores de flujo de aire: <http://www.sensovant.com/>
- Sensor de temperatura Pt100: <http://www.arian.cl/downloads/nt-004.pdf>
- Fabricante de sensor de presión: <http://www.deltaohm.com/>
- Hoja de característica de captador de pulsos: <http://www.farnell.com/datasheets/46862.pdf>
- Manual de convertidor de frecuencia universal: <http://www.guemisa.com/conver/frec.htm>
- Características tacómetro óptico: http://www.betatools.com/catalog/articles/view/1760_slash_TC2/_lang_en/_catlang_en/_catalog_beta/_filters
- Transductor de tensión: <http://www.farnell.com/datasheets/341060.pdf>
- Fabricante de transductor de intensidad: <http://www.lem.com/>
- Agilent, fabricante de sistema de adquisición de datos y tarjeta multiplexora: <http://www.home.agilent.com/>